

کلید واژه‌ها: بارش-رواناب، تغییر اقلیم، حوزه آبخیز کن، شبیه‌سازی، مدل IHACRES.

مقدمه

در دهه‌های اخیر روند تغییرات صنعتی شدن به صورت شگفت‌انگیزی شتاب گرفته است. رشد جمعیت و نیاز روزافزون به غذا، توسعه کمی و رشد صنایع و کارخانجات را اجتناب‌ناپذیر نمود. تخریب محیط زیست و جنگل‌زدایی و تغییر کاربری‌ها از یک طرف و تلاش برای افزایش تولیدات صنعتی و بهره‌گیری بیشتر از صنایع از طرف دیگر، موجب افزایش روزافزون گازهای گلخانه‌ای شده که خود گرم شدن جهانی را به دنبال داشته است، به نحوی که پدیده دگرگونی اقلیمی را از یک موضوع لوکس به مسئله‌ای حائز کمال اهمیت و بسیار جدی تبدیل نموده است. این موضوع در صدر مذاکرات سران کشورهای بزرگ و کوچک قرار گرفته است. با توجه به شرایط موجود در بسیاری از حوزه‌های کشور از لحاظ کمبود آمار و پیچیدگی زیاد اکوسیستم‌های هیدرولوژیکی و عدم شناخت کامل آنها استفاده از روش‌هایی که بتوان به کمک آنها میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوزه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص تخمین زد از اهمیت قابل توجهی برخوردار است [۱۶]. همچنین با توجه به افزایش جمعیت و گسترش فعالیت‌های اقتصادی در دشتهای سیلابی و حاشیه رودخانه‌های اصلی، اهمیت مطالعات در مورد رواناب حداکثر، حجم آب به دست آمده، بده و فراوانی طغیان‌های رودخانه‌های مختلف نیز افزایش می‌یابد. به علت لزوم این محاسبه‌ها، روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل بارندگی و رواناب ارایه شده است که با گذشت زمان، این روش‌ها بهبود یافته و نتایج دقیق‌تری را ارایه می‌دهند [۶]. از آن جا که در حوزه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوزه میسر نمی‌باشد، انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز، پیش‌بینی با دقت قابل قبولی را ارایه کند امری ضروری به نظر می‌رسد [۱۸]. در این میان مدل‌های مفهومی بارش-رواناب مورد استفاده بیش‌تری قرار می‌گیرند. زمانی که لازم است فقط، جریان در خروجی حوزه آبخیز شبیه‌سازی شود، مدل‌های مفهومی اغلب بر انواع دیگر مدل‌ها ترجیح داده می‌شوند زیرا ضمن ارائه پاسخ خوب، به تلاش محاسباتی و داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند [۴]. یکی از این

ارزیابی کاربست مدل IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب سطحی در شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کن)

مسعود گودرزی^{۱*}، بهارک معتمدوزیری^۳ و محمدرضا میرحسینی^۲
 تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

چکیده

حوزه آبخیز یک سیستم باز و پیچیده به شمار می‌رود و بسیاری از تحلیل‌ها و پیش‌بینی رفتار آبی آن مستلزم مدل‌سازی بارش‌های متفاوت آماری-ریاضی است. محدودیت منابع آب و توزیع نامتجانس آن در مناطق مختلف ایران سبب شده است که در مقایسه با بسیاری از کشورها، نسبت به پدیده تغییر اقلیم آسیب‌پذیرتر باشد. از آن جا که در حوزه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوزه امکان‌پذیر نمی‌باشد بنابراین انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار، با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی، پیش‌بینی قابل قبولی از رواناب سطحی ارایه نماید، ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش به ارزیابی عملکرد مدل IHACRES آن جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در حوزه آبخیز کن در طول دوره آماری پایه جهت بررسی تغییرات اقلیمی پرداخته شد و میزان خطای بین مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس معیارهای عملکردی مانند ضریب ناش ساتکلیف، میانگین خطای مطلق، میانگین مربع خطا، ریشه مربع خطا، ضریب تعیین و همبستگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که مدل توانایی شبیه‌سازی داده‌های جریان روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبولی دارد. همچنین مقدار رواناب سه سناریو در سه دوره مورد بررسی در مقایسه با دوره پایه، تا ۱۸/۶۵- درصد تغییر یافته است.

۱- * نویسنده مسئول، استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی massoudgoodarzi@yahoo.com
 mgoodarzi@scwmri.ac.ir

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۳- کارشناس ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری

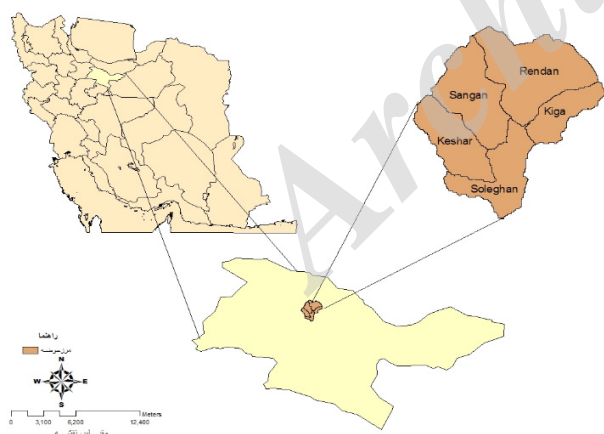
4- Non- linear loss module

کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان روزانه و ماهانه در حوزه آبخیز ناورود پرداختند نتایج نشان داد که نتایج شبیه‌سازی ماهانه نسبت به روزانه دقیق‌تر است. دوستی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل IHACRES به شبیه‌سازی جریان روزانه در حوزه آبخیز تمر پرداختند نتایج حاصل نشان داد که عملکرد مدل در حوزه مورد مطالعه رضایت‌بخش بوده است. وجود روابط غیر خطی، عدم قطعیت و عدم صراحت زیاد و ویژگی متغیرهای زمانی و مکانی در سیستم‌های گردش آبی، هیچ یک از مدل‌های آماری و مفهومی پیشنهاد شده به منظور الگوسازی دقیق بارش و رواناب نتوانسته به عنوان یک مدل برتر و توانا شناخته شوند [۸]. با توجه به گسترش شهرهای بزرگ ایران و رشد صنعتی شدن آن‌ها نیاز به مطالعات آشکار سازی تغییرات اقلیمی افزایش یافته است. رودخانه کن در حاشیه شهر تهران تأثیر زیادی از تغییرات اقلیمی را پذیرفته است. رودخانه کن به عنوان فضای تفرجگاهی منطقه ۲۲ تهران مورد توجه است بعلاوه وجود معادن برداشت شن و ماسه و پتانسیل سیل خیزی این حوزه ضرورت بررسی این پدیده را دوچندان می‌کند. لذا در این پژوهش به ارزیابی کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در دوره پایه جهت بررسی تغییرات اقلیمی در حوزه کن پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

موقعیت حوزه مورد مطالعه در شکل (۱) و همچنین مشخصات زیرحوزه های منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

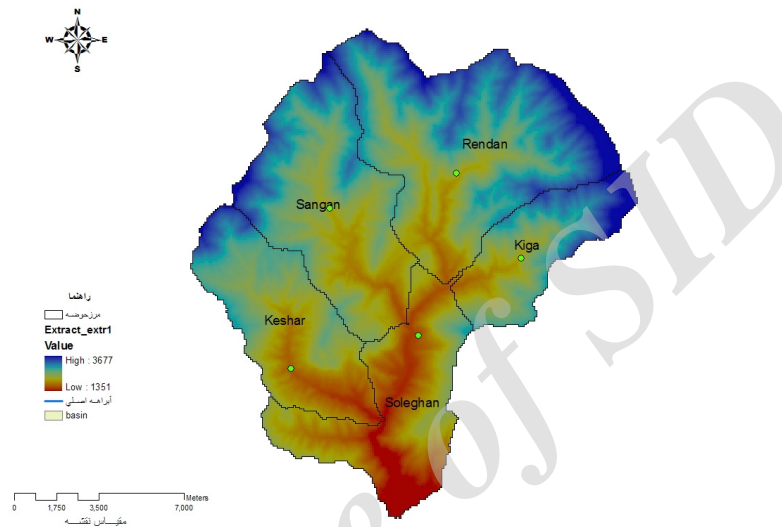
Fig.1. geographic situation of the studied area

مدل‌ها، مدل IHACRES می‌باشد که به علت داده‌های کم تر مورد نیاز بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌ها، به آسانی می‌تواند در بسیاری از حوزه‌های آبخیز به کار برده شود (دی و کروک، ۲۰۰۳). پی و همکاران (۱۹۹۷) به بررسی عملکرد مدل IHACRES در مقایسه با دو مدل دیگر در سه حوزه آبخیز در استرالیا پرداختند نتایج حاصل بر اساس معیار نش- ساتکلیف نشان داد که این مدل دارای کارایی بالایی است. دی و کروک (۲۰۰۳) با استفاده از مدل IHACRES به ارزیابی جریان در دو حوزه آبخیز در آفریقای جنوبی پرداختند نتایج حاصل حاکی از دقت قابل قبول مدل مورد بررسی در شبیه‌سازی جریان است. لیتل وود و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از دو مدل متفاوت، جریان روزانه را در دو حوزه در برزیل شبیه‌سازی کردند نتایج حاصل نشان داد که مدل ساده‌تر مبتنی بر هیدروگراف واحد به خوبی مدل پیچیده‌تر عمل کرده است. کروک و جکمن (۲۰۰۸) قابلیت مدل IHACRES را در چهار حوزه آبخیز در استرالیا را بررسی نمودند نتایج حاصل بر اساس معیار نش- ساتکلیف عملکرد مناسب مدل را نشان داد. کارکانو و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از دو مدل IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی جریان روزانه پرداختند نتایج حاصل حاکی از عملکرد مناسب مدل IHACRES است. مکینتر و الفریشی (۲۰۰۹) با استفاده از سه مدل مختلف به محاسبه دبی و حجم جریان خروجی در حوزه وادی آهین پرداختند نتایج حاصل برتری مدل IHACRES را نسبت به دو مدل دیگر را تأیید نمود. ویز و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از چهار مدل بارش- رواناب تأثیرات تغییرات اقلیمی روی فرآیندهای هیدرولوژی را در استرالیا مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان داد که داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد. آبوشاندی و بوردر (۲۰۱۱) مدل IHACRES جهت برآورد سیل در مقیاس روزانه و در مقیاس‌های واقعه رگبار را در اردن به کار بردند. نتایج نشان داد عملکرد مدل در مقیاس روزانه ضعیف است. زارعی و همکاران (۱۳۸۸) به شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES در کسلیان پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبولی دارد ولی در شبیه‌سازی سالانه از دقت کمتری برخوردار است و شبیه‌سازی جریان ماهانه نسبت به روزانه نیز قابل قبول‌تر است. کمال و مساح‌بوانی (۱۳۸۹) به تأثیر تغییر و نوسانات اقلیمی بر رواناب حوزه با دو مدل هیدرولوژی SIMYED و IHACRES پرداختند نتایج نشان از هماهنگی دو مدل در شبیه‌سازی تغییرات رواناب در منطقه داشت. آشفته و بزرگ‌حداد (۱۳۹۲) به ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع آب با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES در آیدوغموش پرداختند نتایج حاکی از کاهش متوسط بلندمدت رواناب سالانه در سه دوره زمانی آتی نسبت به دوره پایه بود. وردیان و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی زیرحوزه های منطقه مورد مطالعه

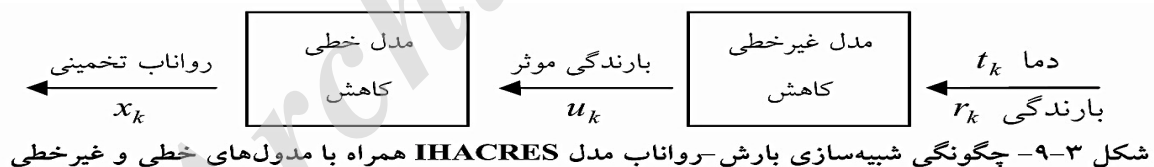
Table 1. geographic characteristics of the studied area

| حداکثر ارتفاع Max. elevation (m) | متوسط ارتفاع Ave. elevation (m) | حداقل ارتفاع Min. elevation (m) | طول آبراهه اصلی Main stream (km) | شیب سطحی متوسط slope (%) | مساحت Area (km ²) | زیر حوزه Sub-basins |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| 3741 | 2560 | 1797 | 11 | 42.75 | 67.67 | Rendan |
| 3290 | 2333 | 1700 | 13.25 | 37.48 | 47.16 | Sangan |
| 3777 | 2686 | 1800 | 9.71 | 43.32 | 24.06 | Kiga |
| 3254 | 2203 | 1586 | 12.73 | 36.8 | 34.94 | Keshar |
| 2700 | 1863 | 1360 | 13.65 | 37.22 | 33.72 | Soleqan |



شکل شماره ۲- موقعیت ایستگاه های باران سنجی در منطقه مورد مطالعه

Fig. 2. rain gauge stations in the studied area



شکل ۳- شبیه سازی بارش-رواناب در مدل IHACRES

Fig.3. simulation of precipitation-runoff in IHACRES

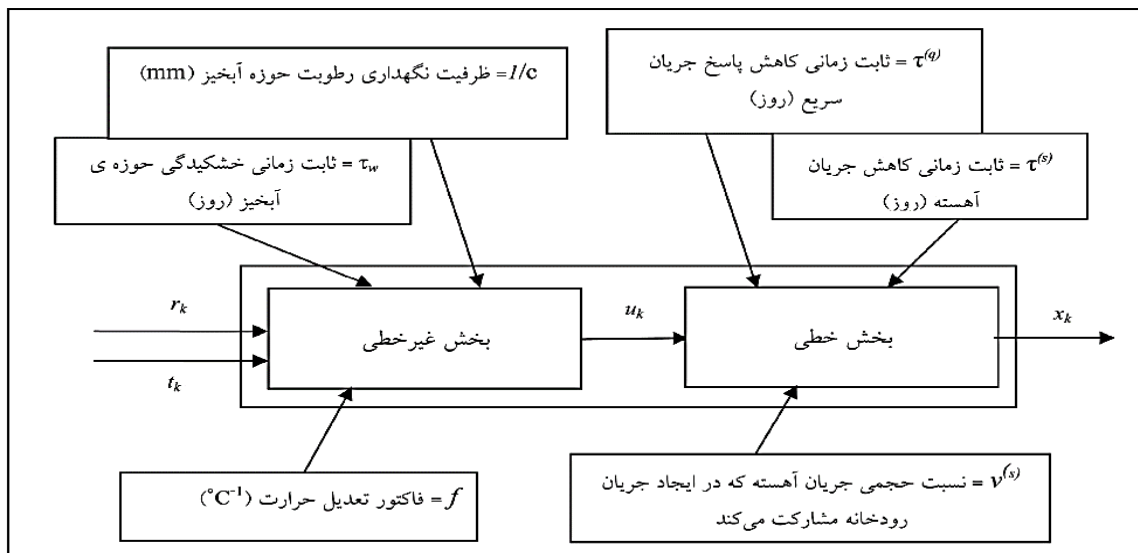
مدل بارش - رواناب IHACRES

این مدل به صورت مشترک به وسیله دانشگاه ملی استرالیا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی انگلستان توسعه یافته است [۲۲]. اساس این روش از دو مدول غیرخطی کاهش^۱ و مدول خطی هیدروگراف^۲ تشکیل می شود. به این منظور در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k توسط مدول غیرخطی، به بارندگی موثر u_k

تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی (شکل ۳) تبدیل می شود [۱۱]. داده های مورد نیاز شامل آمار روزانه پارامترهای دما، بارش و دبی در طول دوره آماری پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) جهت بررسی تغییرات اقلیمی می باشد.

این مدل دارای شش پارامتر است که سه پارامتر آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی شامل پارامتر f ، t_w و c (که به ترتیب مدت زمانی که طول می کشد تا حوزه خشک شود، فاکتور تعدیل دما،

1- Linear unit hydrograph module
2- Nash- Sutcliffe efficiency



شکل ۴- ساختار کلی مدل IHACRES

Fig. 4. general schematic of IHACRES model

اساس رابطه (۶) محاسبه می شود که مقادیر کمتر آن نشان دهنده خطای کمتر مدل در شبیه سازی جریان می باشد و به درصد بیان می گردد. میانگین مربعات خطا (رابطه ۷) که می تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی نهایت تغییر کند [۱۰]. مجذور میانگین مربعات خطا به عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه سازی شده از مقادیر اندازه گیری به کار می رود این معیار که بصورت رابطه (۸) تعریف می شود به عنوان مرسوم ترین شاخص خطا به کار می رود (لین و همکاران، ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا (رابطه ۹) برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه سازی شده با توجه به مقادیر اندازه گیری شده به کار می رود که به صورت رابطه زیر ارائه می گردد [۹]. ضریب همبستگی (رابطه ۱۰) ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه گیری می کند و یک ابزار ریاضی است که در پاره ریزی تحلیل های اقلیمی بسیار کاربرد دارد [۱۷].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (X_o - X_s)^2}{\sum_{t=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^N X_o X_s}{\sqrt{\sum_{t=1}^N X_o^2 \sum_{t=1}^N X_s^2}} \quad (2)$$

$$R^2_{sqrt} = 1 - \frac{\sum (\sqrt{X_o} - \sqrt{X_s})^2}{\sum (\sqrt{X_o} - \sqrt{\bar{X}_o})^2} \quad (3)$$

$$R^2_{log} = 1 - \frac{\sum (\ln(X_o + \epsilon) - \ln(X_s + \epsilon))^2}{\sum (\ln(X_o + \epsilon) - \ln(\bar{X}_o + \epsilon))^2} \quad (4)$$

ظرفیت ذخیره رطوبت حوزه) و سه پارامتر مربوط به تابع تبدیل خطی شامل t^s و t^q به ترتیب مدت زمانی که طول می کشد جریان سریع و آهسته کاهش یابد و ν^s حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد را نشان می دهند شکل (۴) ساختار کلی مدل را نشان می دهد [۲۲].

معیارهای ارزیابی

جهت ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل های تخمین و پیش بینی شاخص های عملکردی مختلفی وجود دارد که در ادامه به توضیح مختصری راجع به شاخص های مورد استفاده در این پژوهش پرداخته می شود. در رابطه (۱) که تحت عنوان ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) شناخته می شود. اگر مقدار NSE برابر با یک باشد نشان دهنده این است که تناسب کامل بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده وجود دارد اگر این مقدار بین ۰/۳۶ و ۰/۷۵ باشد نتایج مدل رضایت بخش به شمار می رود و اگر بیشتر از ۰/۷۵ باشد نتایج شبیه سازی مدل خوب توصیف می گردد [۱۵]. در واقع معیار کارایی نش-ساتکلیف اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه سازی شده را در مقایسه با واریانس داده های مشاهداتی نشان می دهد. ضریب تعیین نیز معیاری بدون بعد و بهترین مقدار آن برابر یک می باشد. رابطه (۲) نحوه محاسبه آن را نشان می دهد [۱۷]. سایر معیارها بر اساس معیار ضریب تعیین بنا نهاده شده اند با این تفاوت که مقادیر شبیه سازی شده با مقادیر ریشه مربعات (رابطه ۳)، لگاریتم (رابطه ۴) و عکس مقادیر (رابطه ۵) جایگزین شده اند و برای ارزیابی خطا در جریان های کم مناسب تر هستند [۱۳]. معیار خطای نسبی نیز بر

1-*Corresponding Author, Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, massoudgoodarzi@yahoo.com , mgoodarzi@scwmri.ac.ir

دوره واسنجی جهت از بین بردن خطاهای مربوط به بارش و دبی باید دوره‌ای را به عنوان وارم‌آپ مدل تعیین کرد. که در این تحقیق به جهت نیمه خشک بودن حوزه دوره زمانی ۲۰ روز به عنوان دوره وارم‌آپ انتخاب گردید. میزان تاخیر بین بارش و رواناب در دوره واسنجی بدست آمد که در شکل ۵ نمودارها تاخیر ایجاد شده بین بارش و رواناب را نشان می‌دهد.

به منظور شبیه‌سازی جریان در مقیاس‌های روزانه، ماهانه و سالانه ابتدا مدل IHACRES واسنجی شده و در مرحله بعد مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج حاصل از پارامترهای محاسبه شده مدل برای ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در مرحله واسنجی که با استفاده از روش سعی و خطا در دوره‌های مختلف صورت گرفت در جدول (۲) آورده شده است. مقدار پارامتر V^8 نشان دهنده‌ی میزان مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه‌ای است به گونه‌ای که مقادیر زیاد این پارامتر نشان دهنده‌ی وجود جریان پایه‌ی بیش‌تر در رودخانه می‌باشد. مقادیر بدست آمده در این پژوهش حاکی از وجود جریان پایه نسبتاً متوسط در ایجاد جریان رودخانه‌ای می‌باشد. مقدار پارامتر C (ظرفیت نگهداری رطوبت حوزه) نشان دهنده‌ی سرعت واکنش حوزه آبخیز نسبت به بارش می‌باشد، به گونه‌ای که هرچه این مقدار بیش‌تر باشد حوزه واکنش آهسته‌تری نسبت به بارش نشان می‌دهد که بر اساس نتایج حاصل مقدار پارامتر یاد شده بسیار کم است و بنابراین حوزه آبخیز مورد بررسی نسبت به بارش با سرعت زیادی واکنش نشان می‌دهد که ناشی از عدم و یا کمبود پوشش گیاهی و جنگلی و کاربری اراضی زراعی و مرتع است چرا که کاربری جنگلی و پوشش گیاهی مناسب باعث نگه داشت بارش می‌شود تا با تاخیر به جریان رودخانه اضافه شود.

$$R^2 \text{ Inv} = 1 - \frac{\sum \left(\frac{1}{X_o + \varepsilon} - \frac{1}{X_s + \varepsilon} \right)^2}{\sum \left(\frac{1}{X_o + \varepsilon} \right)^2} \quad (5)$$

$$RE = \frac{X_o - X_s}{X_o} \times 100 \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2 \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (8)$$

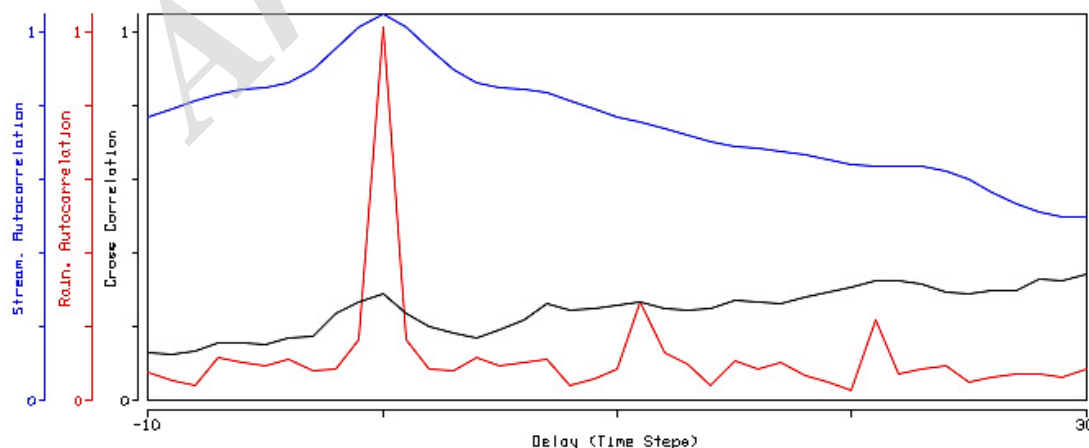
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)^2}} \quad (10)$$

در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، \bar{X}_o میانگین داده‌های مشاهداتی، N تعداد داده‌ها و ε مقداری است که برای داده‌های صفر جریان مشاهداتی در نظر گرفته می‌شود.

نتایج

پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از مراکز مربوطه دوره آماری ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ که به عنوان دوره پایه جهت بررسی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی آینده پارامترهای اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان دوره آماری مشترک انتخاب گردید پس از اطمینان از همگنی داده‌ها دو سال ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ به عنوان دوره‌ی آماری واسنجی و سال ۱۹۹۸ به عنوان دوره اعتبار سنجی انتخاب شد. پس از تعیین

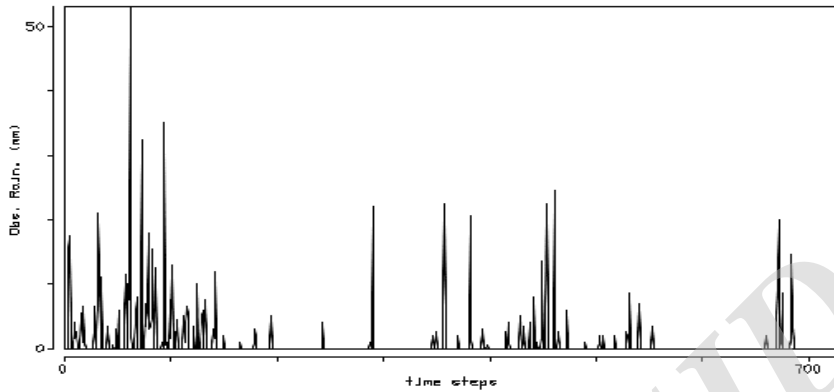


شکل ۵- نمودار میزان تاخیر بین بارش و رواناب حوزه آبخیزکن

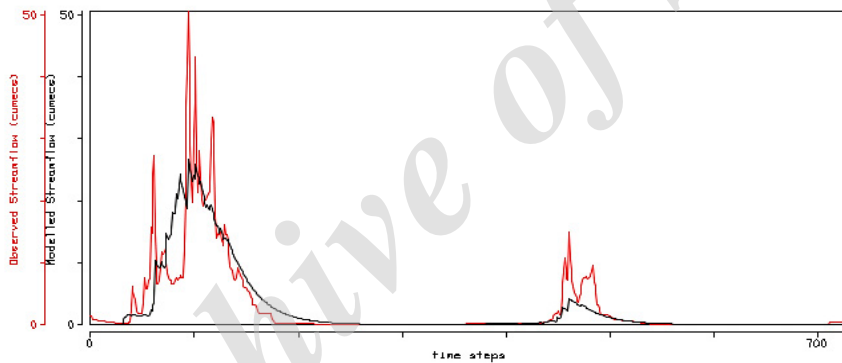
Fig. 5. lag between precipitation and runoff in Kan basin

شکل ۷ رواناب شبیه‌سازی شده و شکل ۸ خطای مدل‌سازی رواناب در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد.

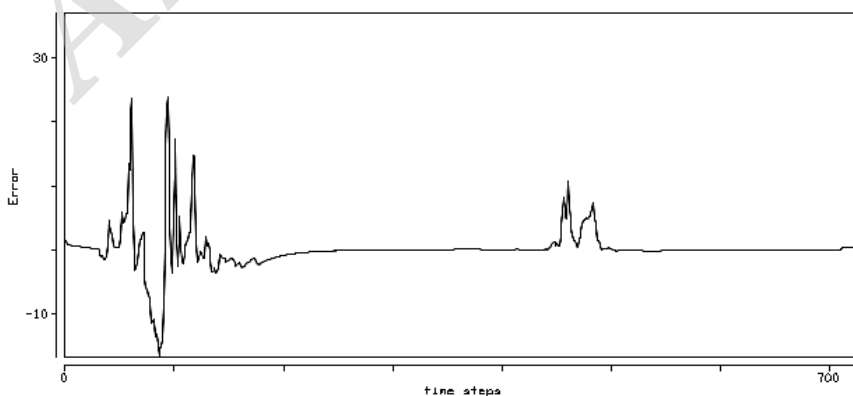
شکل ۶ مقدار بارش روزانه مشاهداتی در دوره واسنجی (از ۱ ژانویه ۱۹۹۶ تا ۳۱ دسامبر ۱۹۹۷) را نشان می‌دهد. که مقادیر بارش بر حسب میلی‌متر و مقادیر دبی بر حسب میلیون‌لیتر در روز می‌باشد.



شکل ۶ - نمودار بارش روزانه مشاهداتی در دوره واسنجی
Fig. 6. Daily observed precipitation in calibration period



شکل ۷- نمودارهای دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی
Fig. 7. observed discharge along with simulated discharge in calibration period



شکل ۸- نمودار خطای مدل‌سازی رواناب در دوره واسنجی
Fig. 8. runoff modeling error in calibration period

در شکل ۹ پراکنش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی ارائه شده است.

اعتبارسنجی مدل IHACRES

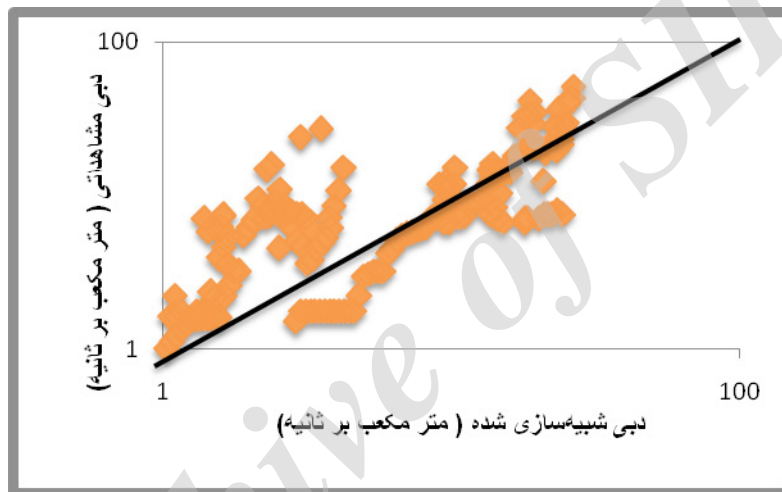
شکل ۱۰ مقادیر بارش مشاهداتی در طول مدت اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. که مقادیر بارش بر حسب میلی‌متر و مقادیر دبی بر

مقایسه نمودارهای دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه می‌باشد. نتایج مقایسه شاخصه‌های آماری هم نشان از رضایت بخش بودن مدل در شبیه‌سازی رواناب در دوره واسنجی دارد. در جدول ۲ مقادیر مربوط به شاخص‌های ARPE، NS و Bias در مرحله واسنجی مدل بارش-رواناب IHACRES ارائه شده است. همچنین

جدول ۲- نتایج واسنجی مدل IHACRES در دوره ۹۷-۱۹۹۶

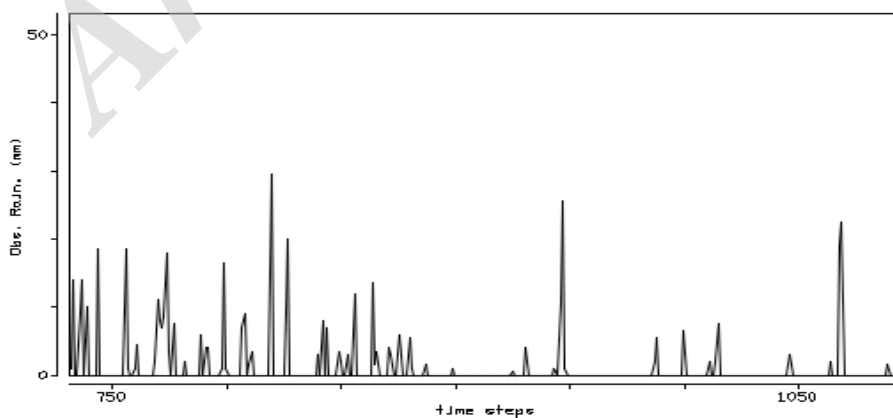
Table 2. calibration results of IHACRES in 1996-97

| ARPE | BIAS | R_5 | NSE |
|--------|-------|-------|-----|
| 0.0056 | 0.357 | 73.4% | 81% |



شکل ۹- نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی

Fig. 9. observed and simulated discharge in calibration period

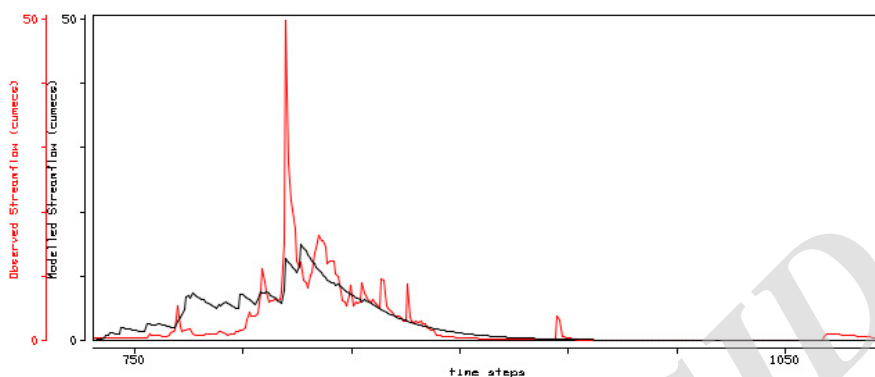


شکل ۱۰- نمودار بارش روزانه مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی

Fig. 10. observed daily precipitation in verification period

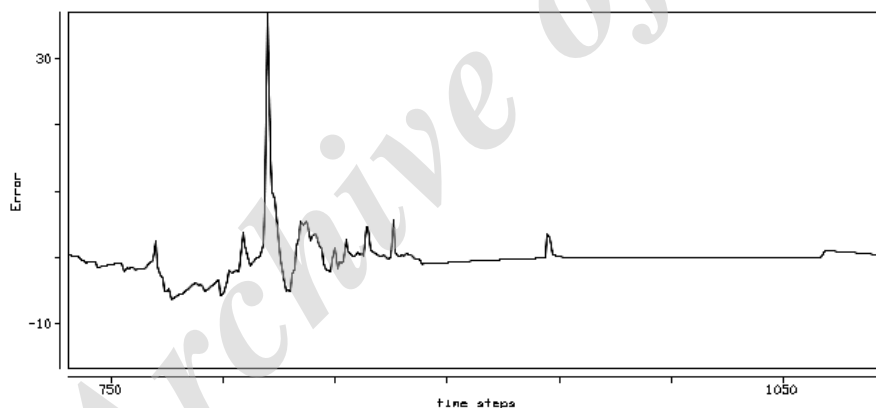
IHACRES ارائه شده است. مقایسه نمودارهای دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه می‌باشد. نتایج مقایسه شاخصه‌های آماری هم نشان از خوب بودن

حسب میلیون لیتر در روز است. شکل ۱۱ مقدار رواناب روزانه شبیه‌سازی شده و شکل ۱۲ خطای مربوط به شبیه‌سازی رواناب را نشان می‌دهد. در جدول ۳- مقادیر مربوط به شاخص‌های NS، ARPE و Bias در مرحله واسنجی مدل بارش-رواناب



شکل ۱۱- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی

Fig. 11. observed discharge along with simulated discharge in verification period



شکل ۱۲- خطای مدل‌سازی رواناب در دوره اعتبارسنجی

Fig. 12. runoff modeling error period in verification period

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی مدل IHACRES در سال ۱۹۹۸

Table 3. verification results of IHACRES in 1998

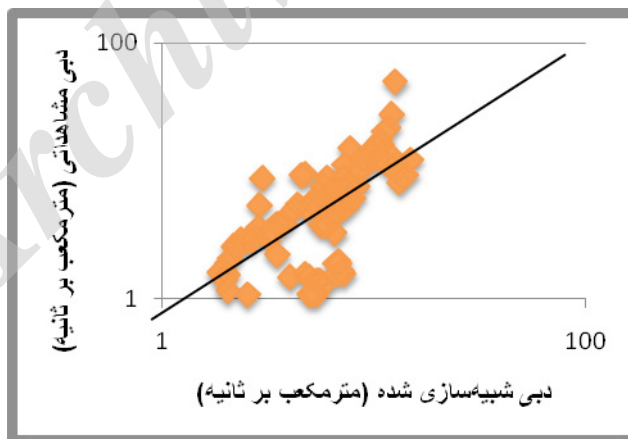
| ARPE | BIAS | R_5 | NSE |
|-------|---------|-------|-----|
| 0.001 | - 0.325 | 60.7% | 87% |

سناریو A2، A1B و B1 ارائه شده است. مقادیر تغییرات ماهانه رواناب حوزه آبخیز کن در دوره های ۲۰۱۱-۲۰۳۰ به ترتیب در شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.

نتایج مدل در شبیه‌سازی رواناب دوره اعتبارسنجی دارد. در شکل ۱۳ نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی مدل ارائه شده است. همچنین در جدول ۴ مقدار رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و برای سه

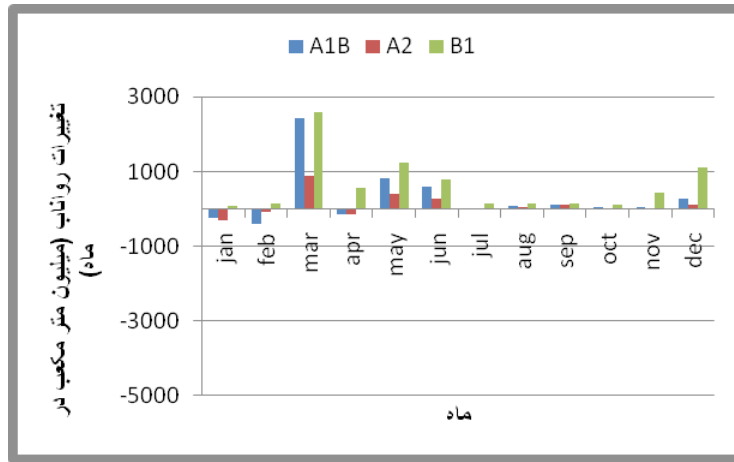
جدول ۴- دبی مشاهداتی در دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۱ و دبی شبیه سازی شده حوضه کن در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ (میلیون متر مکعب در ماه)
Table 4, observed discharge in base period and simulated discharge in Kan basin in (MCM per month)

| سالانه | دسامبر | نوامبر | اکتبر | سپتامبر | اوت | ژولای | ژوئن | می | آوریل | مارس | فوریه | ژانویه | Months | ماه‌ها |
|--------|--------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------------------|--------------|
| Annual | Dec. | Nov. | Oct. | Sep. | Aug. | July | June | May | Apr. | March | Feb. | Jan | | |
| 76.683 | 3.187 | 3.066 | 0.689 | 0.255 | 0.348 | 0.570 | 2.616 | 12.321 | 27.138 | 16.172 | 5.635 | 3.686 | دوره پایه | Base period |
| 80.324 | 3.472 | 3.125 | 0.728 | 0.378 | 0.424 | 0.581 | 3.209 | 14.129 | 27.005 | 18.592 | 5.223 | 3.461 | سناریو A1B | A1B Scenario |
| 78.062 | 3.300 | 3.096 | 0.703 | 0.377 | 0.399 | 0.589 | 2.884 | 13.721 | 26.987 | 17.073 | 5.564 | 3.369 | سناریو A2 Scenario | A2 Scenario |
| 84.209 | 4.286 | 3.509 | 0.796 | 0.402 | 0.496 | 0.702 | 3.403 | 14.569 | 27.693 | 18.777 | 5.796 | 3.780 | سناریو B1 | B1 Scenario |

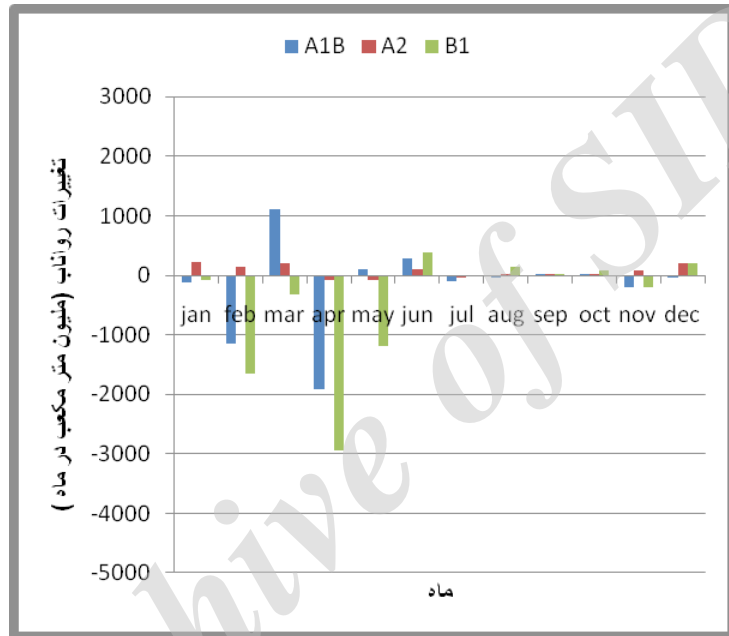


شکل ۱۳- پراکنش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی

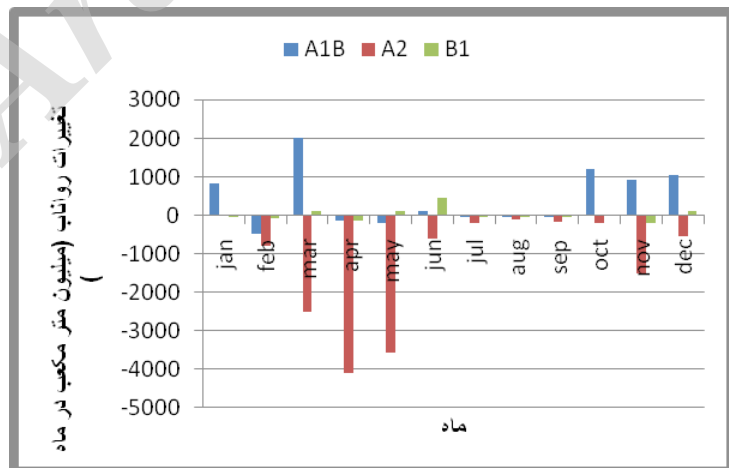
Fig.13. observed and simulated runoff in verification period



شکل ۱۴- نمودار مقایسه تغییرات ماهانه رواناب حوضه کن در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰
 Fig.14, monthly changes of runoff in Kan basin during 2011-2030.



شکل ۱۵- نمودار مقایسه تغییرات ماهانه رواناب حوضه کن در دوره ۲۰۴۶-۲۰۶۵
 Fig.14, monthly changes of runoff in Kan basin during 2046-2065.



شکل ۱۶- نمودار مقایسه تغییرات ماهانه رواناب حوضه کن در دوره ۲۰۸۰-۲۰۹۹
 Fig.14, monthly changes of runoff in Kan basin during 2080-2099.

به دلیل محدودیت امکان اندازه‌گیری جریان رودخانه‌ای در زمان‌ها و مکان‌های مختلف استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان باشد که به تصمیم‌گیری جهت مدیریت منابع آب سطحی و مدیریت پایدار منابع آب کمک فراوانی خواهد کرد؛ بنابراین انتخاب یک مدل ساده با کاربری آسان و ورودهای قابل دسترس از بین مدل‌های پیچیده هیدرولوژی امری مهم برای مدیران تلقی می‌گردد. لذا در این پژوهش به شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای در حوزه آبخیز کن با استفاده از مدل IHACRES در دوره پایه جهت بررسی تغییرات اقلیمی (۱۹۹۰-۱۹۶۱) پرداخته شد. با توجه به نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه‌ای، بر اساس معیارهای عملکردی مختلف، مشخص شد که مدل در شبیه‌سازی جریان در ایستگاه‌های مورد بررسی از دقت مناسبی برخوردار است و مقادیر جریان ماهانه را بهتر از مقادیر جریان روزانه شبیه‌سازی می‌کند که با نتایج مطالعات زارعی و همکاران (۱۳۸۸) در حوزه آبخیز کسلیان، آشفته و بزرگ‌حداد (۱۳۹۲) در حوزه آیداغموش و وردیان و همکاران (۱۳۹۳) در حوزه ناورود مطابقت دارد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است در دوره آینده نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱) در سناریوی A1B: بیش‌ترین افزایش رواناب به ترتیب در مارس و قابل مشاهده است و بیش‌ترین کاهش رواناب در ماه فوریه و در اواخر زمستان اتفاق می‌افتد. در سناریوی A2، بیش‌ترین افزایش رواناب در ماه مارس دیده می‌شود و بیش‌ترین کاهش رواناب نیز در ماه ژانویه اتفاق می‌افتد. در سناریوی B1: بیش‌ترین افزایش رواناب در ماه مارس و بیش‌ترین کاهش نیز در ژانویه ملاحظه می‌شود. در مجموع با نگاهی به نتایج به دست آمده از دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان دریافت که با استناد به معیارهای ارزیابی به ویژه NSE نتایج ارزیابی مدل در دو مقیاس روزانه و ماهانه خوب و مناسب توصیف می‌گردد که با نتایج کروک و جکمن (۲۰۰۸) مطابقت دارد. بررسی مقادیر جریان سالانه نیز نشان داد که مدل IHACRES مقادیر سالانه را نسبت به مقادیر ماهانه ضعیف‌تر شبیه‌سازی نموده است که با مطالعات زارعی و همکاران (۱۳۸۸) در این زمینه مطابقت دارد همچنین مدل توانایی بالاتری در تخمین رواناب در زیرحوزه‌های با مساحت کم دارد که با مطالعات دای و کروک (۲۰۰۳) در چند حوزه آفریقای جنوبی مطابقت دارد. با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی مدل IHACRES با استفاده از معیارهای کارایی مختلف، ورودی‌های کم و با توجه به سطح دقت نشان داده شده، می‌توان استفاده از این مدل را جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای در دو مقیاس روزانه و ماهانه در حوزه آبخیز کن توصیه نمود و از آن جهت بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر رواناب و جریان رودخانه‌ای طی دوره‌های آتی استفاده نمود. نمودارهای ۱۵ و ۱۶ بسیار هشدار دهنده هستند و نشان دهنده این مساله هستند که برخلاف دوره آینده نزدیک، در دوره‌های آینده میانه و آینده دور پیش‌بینی مدل حاکی

از آن است که در ماههای مارس، آوریل و می یعنی اواخر زمستان و بهار با کاهش رواناب مواجه خواهیم شد که مسولین باید در این خصوص دقت نموده و برای مصارف آینده برنامه ریزی دقیق‌تری را در نظر بگیرند.

منابع

1. Abushandi, E.H., and Broder, M. 2011. Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. *J. Water Clim. Change*. 2: 56-71.
2. Ashofteh, P., Bozorg Hadad, O., 2012, An Approach to Assessing Climate Change Impacts on Runoff, *Water Resources Engineering Journal*, Vol. 6, pp 51-66 (in Persian).
3. Carcano, E.C., P. Bartolini, M. Muselli and L. Piroddi. 2008. Jordan Recurrent Neural Network Versus IHACRES in modeling daily stream flows. *Hydrology*, 362: 291-307.
4. Cooper V. A. Nguyen V. T. V. and Nichol J. A. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology*. 334(3-4):455-466.
5. Croke B. F. W. and Jakeman A. J. 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semiarid regions. In: Weather H. S. Sorooshian S. and Sharma K. D. (Eds.), *Hydrological Modeling in Arid and Semi-arid Areas*. Cambridge University Press, Cambridge. pp.41-48.
6. Dusti, M., Shahedi K., Habibnejad Roshan, M., Miryaqubzadeh, M., 2014, Using IHACRES Semi-distributed Model in Simulation of Daily Flow: a case study in Tamer Basin, *Journal of Water and Soil Conservation*, Vol. 21, No. 2 pp 277-292 (in Persian).
7. Dye, P.J., Croke, B.F.W. 2003. Evaluation of stream flow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modeling and Software*, 18: 705-712.
8. Golian, S., Abrishamchi, A., Tajrishi, M., 2007, Analysis of Water Usage Policies Using Dynamic Systems, *Journal of Water and Waste Water*, Vol. 63, pp 70-80 (in Persian).
9. Hu, T.S., Lam, K.C., Ng, S.T. 2001. River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, 46: 729-745.
10. Karamuz M., Ramezani, F., Razavi, S., 2006, Prediction of Long-term Precipitation Using Weather Signals:

17. Sedaqatkerdar, A., Fatahi, E., 2008, Early Warning Drought Indices in Iran, *Journal of Geography and Development*, Vol. 6, No. 11, pp 59-76 (in Persian).
18. Sharifi, F., Safarpur, Sh., Ayubzadeh, A., 2014, Assessment of AWBM2002 in Simulation of Hydrologic Processes in a number of Basins in Iran, *Journal of Research and Construction* Vol. 63, pp 35-42 (in Persian).
19. Vaze, J., D.A. Post, F.H.S. Chiew, J.M. Perraud, N.R. Viney and J. Teng. 2010. Climate non-stationarity- validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Hydrology*, 394: 447-457.
20. Vardian, F., Shahedi, K., Habibnejad Roshan, M., Zareie, M., 2014, Assessment of IHACRES Model in Simulation of Daily and Monthly Flow in Navrud Gilan, *Iranian Journal of Water Research*, Vol. 8, No. 15, pp 229-233 (in Persian).
21. Ye, W., Bates, B.C., Viney, N.R., Sivapalan, M., Jakeman, A.J., 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research* 33 (1), 153-166.
22. Zareie, M., Qanbarpur, M., Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., 2009, Simulation of River Flow Using IHACRES : A case Study in Kasilian Basin, *Journal of Iranian Engineering Sciences and Watershed Management* Vol. 8, pp 10-20 (in Persian).
- Application of Artificial Neural Network, 7th International Congress on Engineering, Tehran, 11p. (In Persian).
11. Kamal, A., Massah, A., 2010, Climate Change Impacts on Basin Runoff Considering Uncertainty of Two Hydrologic Model, *Journal of Water and Soil*, Vol. 5, pp 920-931 (in Persian).
12. Lin, J.Y., Cheng, C.T., Chau, K.W. 2006. Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Science Journal*, 51: 599-612.
13. Littlewood, I.G., Clarke, R.T., Collischonn, W., Croke, B.F.W. 2007. Predicting daily stream flow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modelling and Software*, 22: 1229-1239.
14. McIntyre, N. and A. Al-Qurashi. 2009. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. *Environmental Modelling and Software*, 24: 726-738.
15. Motovilov, Y.G., Gottschalk, L., Engeland, K., Rohde, A. 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 98-99: 257-277.
16. Najafi, M., 2012, *Hydrologic Systems, Modelling Precipitation-Runoff*, Vol. 1, Tehran University, pp 578 (in Persian).

Abstract

Assessment of IHACRES Model in Surface Run-off Simulation in Climate Change Status (Case Study: Kan Basin)

M. Goodarzi¹, B. Motamed Vaziri² and M. Mirhosseini³

Received: Accepted:

Attention to the suspended sediment issue is a fundamental subject in the regional and strategic programming. In the other hand, lack of proper database of this phenomenon has been causing serious problems. By developing of the societies, increasing pressure to the natural resources, causing more flooding events and sediment removal in the near future is expected. Therefore trying to enhance sediment databases is essential. In the present study, in order to enhance sediment database in hydrometric stations of Iran, optical suspended sediment estimator was constructed and calibrated in the laboratory and also in the field conditions. Laboratory calibration was carried out in two stages including, high and low sediment yield flows. Validation curves drawn for this process, represents a very good correlation between the actual and the estimated suspended sediment data. The R2 statistic for low and high sediment concentration is 0.995 and 0.98 respectively. The field validation test of device was carried out in Mehriz River in the Yazd province of Iran, and indicated the appropriate performance of this instrument.

Keywords: *Suspended sediment, Flood, Transmitted light, Optical estimator.*

1.*Corresponding Author, Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Tehran, mas-soudgoodarzi@yahoo.com , mgoodarzi@scwmri.ac.ir

2. Assistant Professor, Faculty of Agriculture & Watershed Management, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

3. Master of Science in Watershed Management, Faculty of Agriculture & Watershed Management, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.