نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۰، ص. ۱۱۴-۱۰۴

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 1, Mar-Apr 2011, p. 104-114

کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه

مهدی زارعی[1*]- محمود حبیب نژاد روشن[2]- کاکا شاهدی[3]- محمدرضا قنبرپور[4]

تاریخ دریافت:۸۸/۱۲/۱۵
تاریخ پذیرش:۸۹/۸/۳۰

چکیده

اکثر سامانه‌های هیدرولوژیکی بسیار پیچیده‌اند و نمی‌توان آن‌ها را به طور کامل شناخت، بنابراین برای شناخت یا کنترل برخی از جنبه‌های رفتار آن‌ها نظیر روابط بیلان آبی، ساده‌سازی یا خلاصه کردن آنها امری ضروری است. مدل‌های هیدرولوژیکی ساختار ساده‌ای از سامانه‌های پیچیده چرخه آب در طبیعت می‌باشند. هدف اولیه یک مدل هیدرولوژیکی، پیش‌بینی کار سامانه پیچیده و بررسی اثر هر گونه تغییر روی عملکرد سامانه است. در این پژوهش از مدل هیدرولوژیکی IHACRES برای شبیه‌سازی جریان روزانه و محاسبه میزان بارشی که به جریان رودخانه می‌پیوندد، در حوضه آبخیز کسیلیان (مساحت برابر ۳۴۲/۸۶ کیلومتر مربع) و زیرحوضه معرف کسیلیان (مساحت برابر ۶۷/۸ کیلومتر مربع) استفاده شده است. نتایج تحقیق حاکی از عدم وجود تأخیر بین بارش و جریان در دو حوضه بوده، همچنین بر اساس مقادیر دو پارامتر ضریب تشخیص (D) و میانگین خطای نسبی پارامتر (ARPE)، این مدل جریان رودخانه را در حوضه آبخیز کسیلیان با دقت بیشتری نسبت به زیرحوضه کسیلیان شبیه‌سازی نموده است. در مجموع با توجه به مقادیر خطا در حجم جریان (Bias)، متوسط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در دو حوضه بیش از جریان مشاهداتی است. میزانی از بارش که در ایجاد جریان رودخانه حوضه آبخیز کسیلیان دخالت داشته حدود یک سوم متوسط بارش حوضه و در زیرحوضه کسلیان نیز بترتیب در دوره واسنجی و ارزیابی ۲۱۶ و ۲۳۱ میلی‌متر در سال برآورد شده است.

واژه های کلیدی: مدل هیدرولوژیکی، IHACRES، کالیبراسیون، ارزیابی

مقدمه

ارزیابی دقیق جریان اثرات اقتصادی چشمگیری دارد بطوریکه در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب،کنترل آلودگی، طرح‌های مهندسی آب، مصارف کشاورزی، خسارات ناشی از سیل و حفظ و بهره‌وری مناسب از منابع طبیعی ضروری به نظر می‌رسد (۲۰). مدل‌های هیدرولوژیکی که روابط آماری مناسبی بین پارامترهای خود و مشخصات فیزیکی حوضه برقرار می‌کنند، پایه و اساس مناسبی برای پیش‌بینی جریان در حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شوند (۲۳). در بین مدل‌های بارش-رواناب، مدل IHACRES[5] به علت داده‌های اندک مورد نیاز بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌ها، به آسانی می‌تواند در بسیاری از حوضه‌های آبخیز بکار برده شود (۱۳)، به طوریکه این مدل برای داده‌های با پایه زمانی ۶ دقیقه تا یک ماه و برای حوضه‌های آبخیز با مساحت‌های متنوع از $۴۹۰m^2$ در چین تا $۱۰۰۰۰ km^2$ در انگلستان استفاده شده است (۲۲). در ابتدا به برخی تحقیقات صورت گرفته با استفاده از مدل هیدرولوژیکی IHACRES در مناطق مختلف اشاره می‌گردد:

یی و همکاران مدل IHACRES را برای ۳ حوضه آبخیز با آبدهی محدود در استرالیا (به ترتیب با مساحت ۰/۸۲، ۱۵ و ۵۱۷ کیلومتر مربع با متوسط آبدهی سالانه تقریبا ۱۰، ۱۲ و ۲ درصد بارش) در پایه‌های زمانی روزانه بکار بردند. عملکرد آن با یک مدل مفهومی ۲۲ پارامتری (LASCAM[6]) و یک مدل مفهومی ۸ پارامتری (GSFB[7]) مقایسه شده بود. خطای مطلق در جریان روزانه با استفاده از IHACRES ۰/۱۰ میلی‌متر در روز در دوره ارزیابی محاسبه شده بود. به هر حال کارآیی مدل بر اساس معیار ناش- ساتکلیف بالا بوده و بنابراین مدل بسیار خوب عمل کرده است. ضمنا نشان دادند که

۱،۲،۳و۴- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیاران گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
(*- نویسنده مسئول: Email:mehdizareii2007@gmail.com)

5- Identification of Unit Hydrograph and component Flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow Data

6- Large Scale Catchment Model
7- Generalized Surface infiltration Baseflow Model

مدل LASCAM به طور کلی در هر دو دوره ارزیابی و واسنجی با یک انحراف مطلق متوسط برابر ۰/۰۸ میلیمتر در روز نسبت به IHACRES بهتر عمل کرده است (۲۷). سفتن و هووارت پارامترهای واسنجی شده مدل IHACRES را با ویژگی‌های ۶۰ حوضه آبخیز در انگلستان و ویلز مقایسه کردند. بهترین میزان همبستگی را میان پارامتر روندیابی و درصدی از آبخیزR^2= ۰/۵۹، و بین پارامتر تبخیر و تعرق و میانگین بارندگی سالانه R^2=۰/۶۹ بدست آوردند (۲۶). پست و جیکمن به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه در حوضه‌های آبخیز فاقد آمار جنوب شرقی استرالیا بین پارامترهای مدل و ویژگی‌های حوضه‌های آبخیز رابطه برقرار کرده و برای پیش‌بینی جریان روزانه از داده‌های درجه حرارت، بارش روزانه و ویژگی‌های حوضه استفاده نموده‌اند. برخی از این روابط با صحت قابل قبول تعیین شده ولی برخی دیگر نسبتاً ضعیف بودند به همین دلیل جریان روزانه پیش‌بینی شده از لحاظ کیفیت اختلاف اندکی با جریان مشاهداتی نشان داد (۲۴). دی و کروک به منظور ارزیابی پیش‌بینی‌های جریان در دو حوضه آبخیز آفریقای جنوبی از مدل IHACRES استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که جریان پیش‌بینی شده در حوضه لامبرچباس در دو دوره مختلف (در دوره قبل از جنگلکاری R^2=۰/۸۱ و Bias =۲۵/۸(mm/yr) و در دوره بعد از جنگلکاریR^2=۰/۸۱ و Bias=۸/۴) دقت قابل قبولی داشته است. شبیه‌سازی جریان در حوضه گروت-نیلریور نیز برای دوره‌های نسبتا کوتاه ۳-۲ سال قابل قبول بوده اما کارایی مدل در دوره‌های زمانی طولانی‌تر بدلیل پیش‌بینی‌های ضعیف در برخی سال‌های معین کاهش یافته بود. دلیل اصلی این امر ارزیابی‌های ضعیف بارش حوضه در برخی سال‌ها نسبت داده شده است (۱۷).

کروک و لیتلوود در مقایسه بخش‌های هدر رفت تناوبی در مدل IHACRES و کاربرد آن در ۷ حوضه آبخیز در والز نشان دادند که نسخه CMD مدل عملکرد بهتری نسبت به نسخه سابق آن (PC) برای حوضه‌های آبخیز بزرگتر از ۱۰۰۰ کیلومتر مربع دارد (۱۰). اندرسون و همکاران به منظور نشان دادن اثرات احتمالی کاهش پوشش جنگلی روی دبی رودخانه در دریاچه اری واقع در شمال ایالت متحده آمریکا، بین عوامل مؤثر روی جریان رودخانه رابطه رگرسیونی برقرار کردند، اما نتوانستند یک مدل منطقه‌ای مناسب برای پارامترهای دخیل در روندیابی دبی بدست آورند (۵). کروک و همکاران مدل IHACRES را برای یک حوضه آبخیز ۴۲۰۰۰ کیلومتر مربعی در جنوب والز، استرالیا، به روش نیمه‌توزیعی بکار بردند. آنها نسخه‌ای از IHACRES را که شامل یک بخش رطوبت خاک بود استفاده کردند (۹)، و در روش یکپارچه برای داده‌های روزانه هر زیرحوضه بکار بردند. مقادیر پارامتر IHACRES برای زیرحوضه‌های فاقد آمار را با استفاده از مقادیر متوسط ناشی از زیرحوضه‌های دارای آمار یا بوسیله برقراری روابط محلی تخمین زده بودند، در اینجا آنها بین مقادیر پارامتر و درصد پوشش جنگلی یا مساحت حوضه آبخیز رابطه برقرار کردند. آنها نتیجه گرفتند هرچند عملکرد مدل در دو زیرحوضه به علت کمبود ایستگاه باران‌سنجی رضایتبخش نبود اما در مجموع عملکرد مدل جهت بکارگیری بر حسب موازنه جریان مناسب بوده است (۱۳).

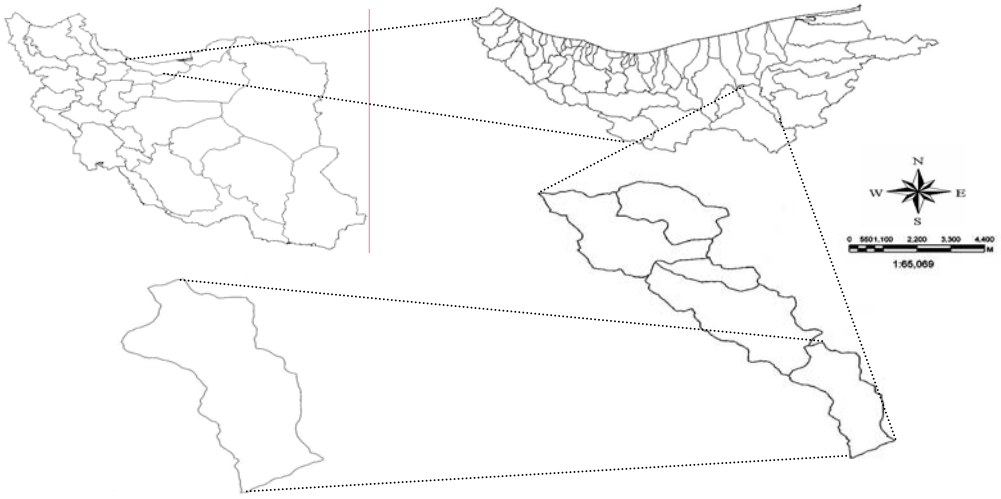
لیتلوود و همکاران با استفاده از پیش‌بینی بارش، جریان روزانه رودخانه را برای دو حوضه در کشور برزیل شبیه‌سازی کردند. آنها نشان دادند که بر حسب دو مدل آماری بکار رفته برای این دو حوضه با رژیم جریان متفاوت، مدل ساده‌تر که مبتنی بر هیدروگراف واحد بوده و برای واسنجی تنها نیاز به داده‌های بارش، جریان و درجه حرارت دارد، تقریبا به خوبی مدل‌های پیچیده‌تر حوضه که به اطلاعات اضافی مانند تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های رقومی ارتفاع، کاربری اراضی و خاک نیاز دارند، عمل می‌کند (۲۳). کروک و جیکمن نیز قابلیت اجرای نسخه توسعه یافته مدل IHACRES را برای چهار حوضه آبخیز یکروزه در استرالیا با دامنه مساحتی از ۱۸۱ کیلومتر مربع تا ۲۵۴۰ کیلومتر مربع نمایش دادند. به طور کلی بر حسب معیار ضریب تشخیص کالیبراسیون مدل (D) عملکرد مدل مناسب نشان داده شد، هر چند عملکرد ضعیف مخصوصاً در سال‌های خشک مشاهده گردید (۱۵). کارلا کارکانو و همکاران طی تحقیقی جهت مدل‌سازی جریان روزانه در مناطق شمالی ایتالیا، دو مدل IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی را مورد استفاده قرار دادند، نتایج آنها نشان داد که وقتی داده‌های ورودی مناسب در دسترس است، عملکرد مدل‌های ساده مانند مدل IHACRES نسبت به یک مدل پیچیده بهتر است (۸). از آنجا که در حوضه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز جهت بررسی عکس العمل حوضه میسر نمی‌باشد، لذا انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز، پیش‌بینی با دقت قابل قبولی را ارائه کند امری ضروری به نظر می‌رسد (۲). لذا در تحقیق حاضر با هدف ارزیابی کارآیی مدل IHACRES جهت شبیه‌سازی جریان روزانه و بررسی میزان بارش مؤثر در ایجاد جریان رودخانه در دو حوضه آبخیز کسیلیان و حوضه معرف کسیلیان و همچنین مقایسه نتایج مدل در این دو حوضه که دارای شرایط مختلف از لحاظ مساحت، میزان بارندگی و رواناب می‌باشند، از مدل مذکور استفاده گردید.

مواد و روش ها

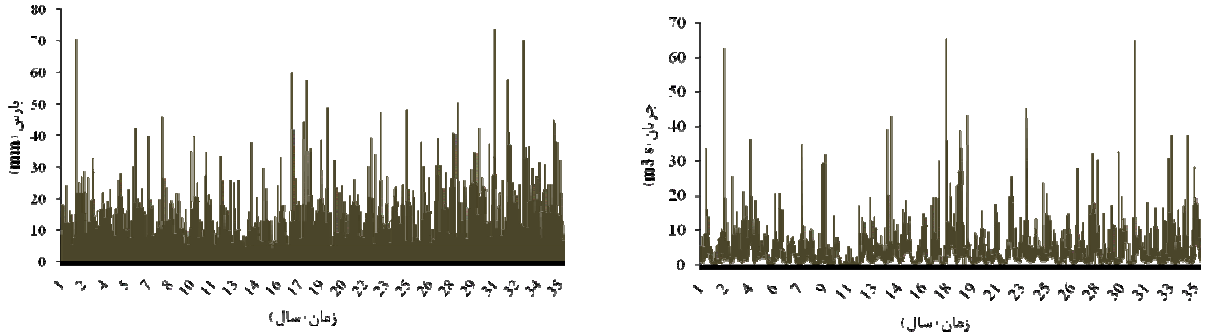
منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش حوضه آبخیز کسیلیان گزینش شد که یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز تالار بوده و در ارتفاعات منطقه مرکزی سلسله جبال البرز، در استان مازندران واقع است. گستره این حوضه

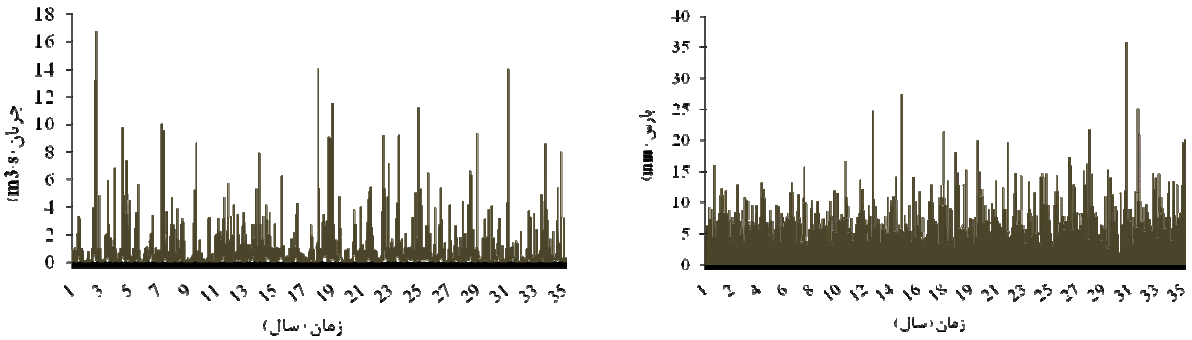
۳۴۲/۸۶ کیلومتر مربع و از نظر جغرافیایی در بین طول شرقی ´۱ °۵۲ تا ´۲۶ °۵۳ و عرض شمالی ´۱ °۳۵ تا ´۳۲ °۳۶ واقع شده است. رودخانه کسیلیان در محل شیرگاه به رودخانه تالار می‌پیوندد که در محدوده جغرافیایی قائمشهر قرار دارد و در خروجی این حوضه، ایستگاه هیدرومتری شیرگاه–کسیلیان می‌باشد. همچنین در پژوهش حاضر زیرحوضه معرف کسیلیان که خروجی آن ایستگاه هیدرومتری ولیک‌بن می‌باشد جهت بررسی در نظر گرفته شده است. وسعت این حوضه ۶۷/۸ کیلومترمربع، بین ارتفاعات ۱۱۰۵ تا ۳۱۶۳ متری قرار داشته و زهکش این حوضه، رودخانه معرف کسیلیان از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کسیلیان می‌باشد (۴). موقعیت حوضه آبخیز کسیلیان و زیرحوضه گزینشی در شکل شماره (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه در ایران و استان مازندران



شکل ۲- جریان رودخانه و بارش مشاهداتی حوضه آبخیز کسیلیان



شکل ۳- جریان رودخانه و بارش مشاهداتی زیرحوضه معرف کسیلیان

شکل‌های (۲) و (۳) میزان بارش و جریان مشاهده‌ای ناشی از آن در طول دوره آماری ۳۶ ساله یعنی از سال آبی (۵۰-۱۳۴۹) تا (۸۵-۱۳۸۴) را به ترتیب برای حوضه آبخیز کسیلیان و زیرحوضه معرف کسیلیان نشان می‌دهند. در نمودارهای زیر بارش بر حسب میلی‌متر و جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

روش بررسی

جمع‌آوری آمار و اطلاعات

در این بررسی در آغاز کلیه آمار و داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی موجود در منطقه جمع‌آوری گردید (جدول ۱). در خروجی حوضه آبخیز کسیلیان ایستگاه هیدرومتری شیرگاه- کسیلیان و در خروجی زیرحوضه معرف از ایستگاه ولیک‌بن استفاده شد. سپس برای تعیین دوره آماری مشترک، اقدام به ترسیم بارگراف ایستگاه‌های مختلف (هیدرومتری، باران‌سنجی و تبخیرسنجی) گردید. پس از ترسیم بارگراف ایستگاه‌ها، سال‌های آبی (۵۰-۱۳۴۹) تا (۸۵-۱۳۸۴) یعنی ۳۶ سال آماری به عنوان دوره آماری مشترک در نظر گرفته شده و دو ایستگاه باران‌سنجی سلیمان تنگه و ولیک چال و سه ایستگاه تبخیر سنجی سلیمان‌تنگه، درزیکلا و اوریملیک به دلیل نواقص فراوان در طول دوره آماری مورد نظر حذف گردیدند، در نهایت ۶ ایستگاه بارانسنجی (سنگده، درزیکلا، کله، تلارم، شیرگاه و ریگ‌چشمه) در حوضه کل و ۴ ایستگاه بارانسنجی (سنگده، درزیکلا، کله و ریگ‌چشمه) در حوضه معرف جهت شبیه‌سازی استفاده گردید. جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. در نهایت جهت تجزیه و تحلیل نتایج از روابط زیر استفاده شد:

$$D = \left[1 - \frac{\sum (Q_O - Q_M)^2}{\sum (Q_O - \overline{Q}_O)^2}\right] \quad (۱)$$

$$ARPE = \left[\left(\frac{\sigma_{a_1}}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{a_2}}{a_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{b_0}}{b_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{b_1}}{b_1}\right)^2\right] \Big/ 4 \quad (۲)$$

$$Bias = \frac{\sum (Q_O - Q_M)}{n} \quad (۳)$$

در روابط فوق:

D: ضریب تشخیص کالیبراسیون مدل،

Q_O : جریان روزانه مشاهده شده،

Q_M: جریان روزانه شبیه‌سازی شده،

متوسط جریان روزانه مشاهداتی

$ARPE$: میانگین خطای نسبی پارامتر، σ: انحراف معیار

b_0, b_1, a_1, a_2 پارامترهای مرتبه دوم تابع انتقال که بر اساس روابط زیر تعیین می‌شوند:

$b_1 = b_0^{(q)}a_1^{(s)} + b_0^{(s)}a_1^{(q)}$, $a_1 = a_1^{(q)} + a_1^{(s)}$ $(-1<a_2<0)$, $a_2 = a_1^{(q)}a_1^{(s)}$ $(-1<a_2<0)$

$Bias$: خطای کل در حجم جریان (mm/yr) و n: تعداد داده‌ها می‌باشند.

پارامترهای D[1]، ARPE[2] و Bias[3] توسط خود مدل مورد محاسبه قرار گرفته، هر چه مقادیر D بیشتر و مقادیر پارامتر ARPE کمتر باشد نتایج مدل ایده‌آل‌تر می‌باشد (۲۳). مقادیر پارامتر Bias هم نشان‌دهنده بیشتر یا کمتر بودن جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است. به عبارتی مشخص می‌کند که مدل جریان را بیش از واقعیت شبیه‌سازی نموده یا کمتر (۱۲).

ساختار مدل مورد استفاده

مدل بارش- رواناب IHACRES مشترکاً توسط هیدرولوژیست‌های مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوضه آبخیز (ICAM) دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی (CEH) انجمن تحقیقات زیست‌محیطی انگلستان توسعه یافته بود که به صورت مستمر در مجلات مرتبط با هیدرولوژی توضیح داده شده است (مثلا : ۱۹، ۱۸، ۲۱، ۲۵). در تحقیق حاضر بسته نرم‌افزاری IHACRES که توسط کروک و همکاران (۱۱و۱۲) توسعه یافته بود، مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مذکور به دو سری داده‌های بارش و درجه حرارت به عنوان ورودی و جهت شبیه‌سازی جریان و همچنین به داده‌های جریان مشاهداتی به منظور واسنجی مدل و بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیاز دارد. مدل IHACRES مانند سایر مدل‌های دیگر (۶) دارای دو بخش است: الف) یک بخش که بارش را در پایه زمانی k (r_k) به بارش مؤثر (u_k)، (بخشی از بارش که سرانجام وارد جریان رودخانه می‌شود) و بارش مازاد که سرانجام توسط تبخیر و تعرق از بین می‌رود (با فرض غیرقابل نفوذ بودن حوضه آبخیز)، تبدیل می‌کند؛ و ب) یک تابع تبدیل خطی (یا هیدروگراف واحد، UH)، که بارش مؤثر را به جریان مدل‌سازی شده (x_k) تبدیل می‌کند. در اینجا این بخش‌ها به ترتیب بخش تلفات و بخش تابع تبدیل (هیدروگراف واحد) نامیده می‌شوند. بخش تلفات برای تمام فرآیندهای غیرخطی بارش- جریان در مقیاس حوضه آبخیز در نظر گرفته می‌شود، بخش تابع تبدیل مبتنی بر تئوری سیستم‌های خطی است (۷ و ۱۶). مدل IHACRES دارای شش پارامتر است، که سه پارامتر آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی (1/c، τ_w و f که بترتیب ظرفیت ذخیره رطوبت حوضه آبخیز، مدت زمانی که طول می‌کشد حوضه آبخیز خشک شود و فاکتور تعدیل حرارت حوضه را نشان می‌دهند) و سه پارامتر مربوط به بخش تابع تبدیل خطی ($\tau^{(q)}$ و $\tau^{(s)}$ به ترتیب مدت زمانی که طول می‌کشد جریان سریع

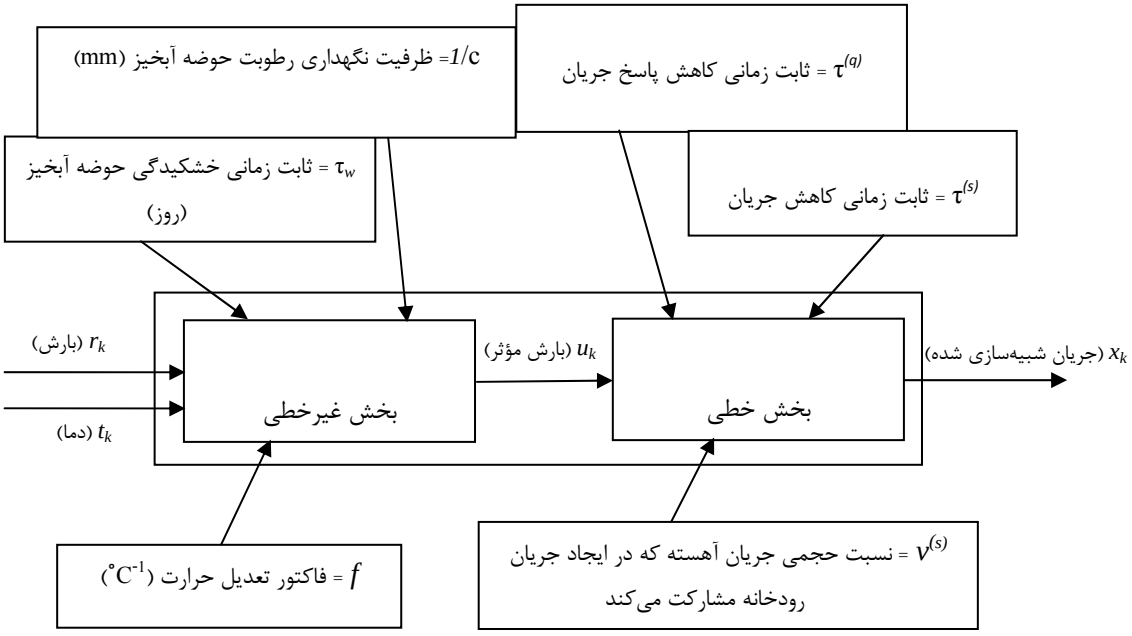
1- Coefficient of determination
2- Average relative parameter error
3- Overall error in flow volume

و آهسته کاهش یابد و $v^{(s)}$ حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد را نشان می‌دهند) می‌باشد. شکل (۴) ساختار کلی مدل مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول۱- مشخصات ایستگاه‌های موجود و ایستگاه‌های مورد استفاده

ردیف	نام ایستگاه		طول	عرض	ارتفاع (m)
۱	سنگده	باران‌سنجی	E ۵۳° ۱۳´ ۴۱˝	N ۳۶° ۳´ ۳۵˝	۱۳۳۷
۲	کله		E ۵۳° ۹´ ۴۵˝	N ۳۶° ۴´ ۱۱˝	۱۵۵۷
۳	درزیکلا		E ۵۳° ۱۲´ ۱۴˝	N ۳۶° ۴´ ۸˝	۱۳۰۰
۴	تلارم		E ۵۳° ۱۵´ ۱۵˝	N ۳۶° ۱۲´ ۱˝	۹۳۰
۵	شیرگاه		E ۵۲° ۵۳´ ۱۰˝	N ۳۶° ۱۷´ ۵۷˝	۲۲۰
۶	سلیمان تنگه *		E ۵۳° ۱۳´ ۵۲˝	N ۳۶° ۱۵´ ۷˝	۴۰۰
۷	ولیک‌چال *		E ۵۳° ۱۳´ ۰˝	N ۳۶° ۵´ ۵۵˝	۱۵۰۰
۸	ریگ چشمه		E ۵۳° ۱۰´ ۷˝	N ۳۶° ۲۱´ ۵۴˝	۴۲۰
۹	شیرگاه	هیدرومتری	E ۵۲° ۵۳´ ۱۴˝	N ۳۶° ۱۸´ ۵˝	۲۲۰
۱۰	ولیک بن		E ۵۳° ۱۰´ ۲۳˝	N ۳۶° ۵´ ۴۶˝	۱۱۰۶
۱۱	سنگده	تبخیرسنجی	E ۵۳° ۱۳´ ۴۱˝	N ۳۶° ۳´ ۳۵˝	۱۳۳۷
۱۲	اوریملیک *		E ۵۳° ۱۳´ ۵۵˝	N ۳۶° ۲´ ۳۷˝	۱۶۲۰
۱۳	سلیمان تنگه *		E ۵۳° ۱۳´ ۵۲˝	N ۳۶° ۱۵´ ۷˝	۴۰۰
۱۴	درزیکلا *		E ۵۳° ۱۲´ ۱۴˝	N ۳۶° ۴ ۸˝	۱۳۰۰

* – ایستگاه‌هایی که بدلیل وجود نواقص آماری فراوان حذف شده



شکل٤- ساختار کلی مدل هیدرولوژیکی IHACRES (۲۳)

نتایج و بحث

بر اساس پایه مشترک آماری و وجود نواقص آماری، ایستگاه‌های باران‌سنجی سنگده، درزیکلا، کله، تلارم، شیرگاه و ریگ‌چشمه در حوضه کل، و چهار ایستگاه باران‌سنجی سنگده، درزیکلا، کله و ریگ‌چشمه در حوضه معرف و همچنین ایستگاه تبخیرسنجی سنگده برای استفاده در شبیه‌سازی انتخاب شدند (جدول ۱). در مورد ایستگاه‌های هیدرومتری با توجه به وجود نواقص آماری در خروجی حوضه معرف (یعنی ایستگاه ولیک‌بن) و به دلیل نیاز به آمار هر دو ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی مدل و بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نواقص آماری ایستگاه هیدرومتری ولیک‌بن با بهره‌گیری از روش نسبت‌ها و مبنا قرار دادن آمار ایستگاه هیدرومتری شیرگاه–کسیلیان، به عنوان ایستگاه دارای آمار کامل بازسازی شد. علت استفاده از این روش برای بازسازی آمار ولیک‌بن، مناسب بودن این روش برای بازسازی آمار رواناب می‌باشد (۳). بررسی صحت داده‌ها بر اساس روش کمی آزمون گردشی در طول دوره آماری ۳۶ سال یعنی از سال آبی (۵۰–۱۳۴۹) تا (۸۵–۱۳۸۴) انجام شد. نتایج این آزمون حاکی از همگنی داده‌ها در سطح ۵ درصد در همه ایستگاه‌ها می‌باشد. مدل IHACRES برای حوضه آبخیز کسیلیان و زیرحوضه آن یعنی حوضه معرف کسیلیان به صورت جداگانه و در مقیاس روزانه در سال‌های آماری (۵۰–۱۳۴۹) تا (۵۷–۱۳۵۶) واسنجی شده و در طول سال‌های آماری (۵۸–۱۳۵۷) الی (۸۵–۱۳۸۴) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج واسنجی مدل در دو حوضه و نتایج مرحله واسنجی مدل به تفکیک سال در حوضه کل کسیلیان بترتیب در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند. شکل‌های (۵) و (۶) بترتیب عملکرد مدل را در شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه معرف و حوضه کل کسیلیان در مرحله کالیبراسیون، شکل (۷) نیز میزانی از بارش که در ایجاد جریان رودخانه حوضه کسیلیان در طول دوره واسنجی مشارکت داشته را نشان می‌دهد، در این شکل‌ها جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، بارش بر حسب میلی‌متر و زمان بر حسب روز می‌باشد. در جداول زیر Q بخشی از بارش است که در کل دوره واسنجی و ارزیابی در ایجاد جریان رودخانه حوضه مشارکت داشته و P بارش کل دوره واسنجی یا ارزیابی بوده و بر حسب میلی‌متر بر سال محاسبه می‌شوند. پارامتر δ نیز تأخیر بین بارش و جریان روزانه می‌باشد که مدل آن را برای دوره واسنجی محاسبه می‌کند.

نتایج بدست آمده از مرحله واسنجی نشان می‌دهد که مدل در بخش‌هایی از طول دوره آماری یاد شده نتایج قابل قبولی را ارائه داده و در برخی دوره‌ها نتایج ضعیف می‌باشد. نگاهی به نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که در هر دو حوضه تأخیری بین مقادیر بارش و جریان مشاهداتی در دوره واسنجی مشاهده نشده است. بر اساس نتایج مرحله واسنجی، مدل در حوضه آبخیز کسیلیان با دقت بیشتری واسنجی شده، همچنین مقادیر جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله واسنجی برای حوضه کسیلیان به طور متوسط کمتر از جریان مشاهداتی بوده و در حوضه معرف بالعکس می‌باشد.

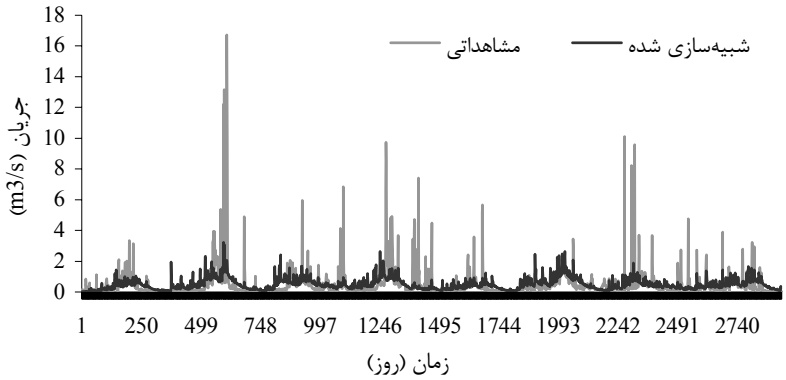
در مرحله بعد ارزیابی مدل در طول سال‌های آبی (۵۸–۱۳۵۷) تا (۸۵–۱۳۸۴) در هر دو حوضه در مقیاس روزانه صورت گرفت که نتایج آن در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعدادی از نمودارهای مربوط به ارزیابی مدل در حوضه‌های آبخیز کسیلیان و حوضه معرف نیز به عنوان نمونه و برای نشان دادن نحوه عملکرد مدل در مرحله ارزیابی در شکل‌های (۸) و (۹) آورده شده‌اند.

جدول ۲- نتایج واسنجی مدل در دو حوضه آبخیز کسیلیان و حوضه معرف در طول دوره ۵۷-۱۳۴۹

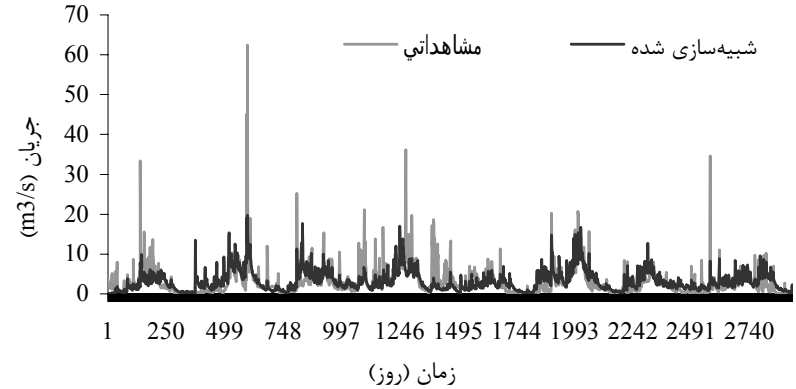
حوضه	*ARPE*	*Bias(mm/yr)*	*D*	*Q(mm/yr)*	*P(mm/yr)*	*δ*
کل کسیلیان	۰/۶۷	۲/۹۸	۰/۴۵۷	۲۸۱	۸۶۹	۰
معرف کسیلیان	۰/۹	-۹/۱	۰/۲	۲۱۶	۳۸۵	۰

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل در حوضه کل کسیلیان به تفکیک سال

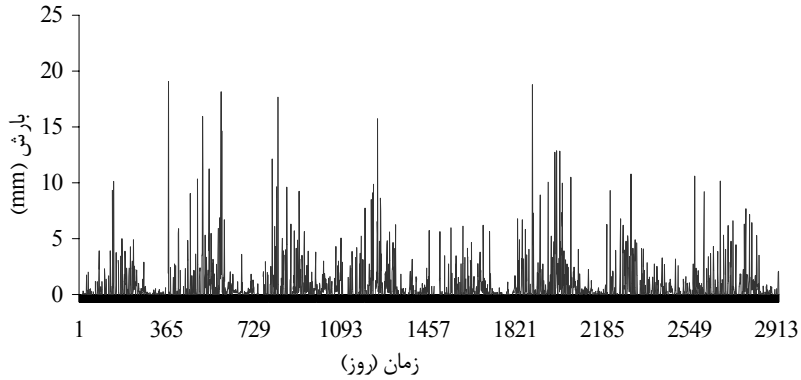
سال آبی	Bias(mm/yr)	D	Q(mm/yr)	P(mm/yr)
۱۳۴۹-۵۰	۷۵/۸	۰/۳۶	۱۷۱	۷۰۲
۱۳۵۰-۵۱	-۵۷/۸	۰/۴۸	۳۶۱	۹۷۱
۱۳۵۱-۵۲	-۲۹/۴	۰/۲۴	۳۱۵	۹۹۹
۱۳۵۲-۵۳	۱۵۷/۴	۰/۱۸	۳۲۱	۹۲۳
۱۳۵۳-۵۴	۳۵/۷	۰/۳۷	۱۷۴	۶۶۰
۱۳۵۴-۵۵	-۳۹/۲	۰/۷	۳۸۵	۹۴۹
۱۳۵۵-۵۶	-۵۹/۵	۰/۳	۲۴۸	۸۵۶
۱۳۵۶-۵۷	-۵۸/۷	۰/۳۷	۲۷۱	۹۰۰



شکل ٥- واسنجی مدل درحوضه معرف کسیلیان در طول دوره ۵۷-۱۳٤۹



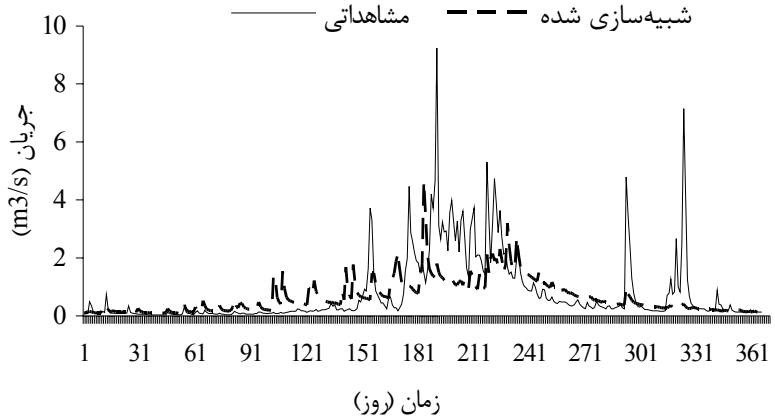
شکل ٦- واسنجی مدل درحوضه کسیلیان در طول دوره ۵۷-۱۳٤۹



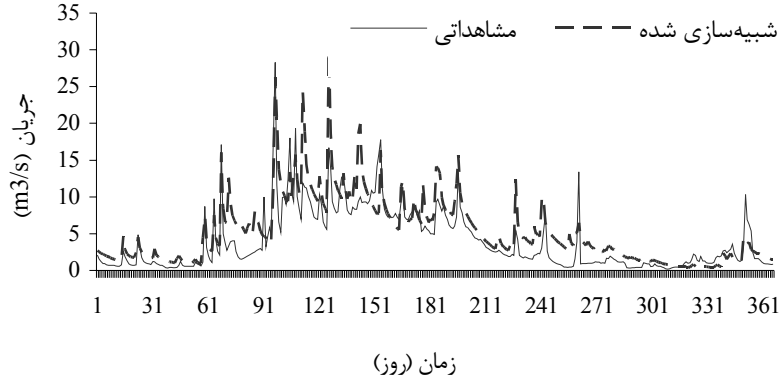
شکل ۷- مقدار بارش روزانه که در ایجاد جریان رودخانه حوضه کسیلیان در دوره واسنجی مشارکت داشته

جدول ٤- نتایج ارزیابی مدل در دو حوضه آبخیز کسیلیان و حوضه معرف در طول دوره ۸۵-۱۳۵۷

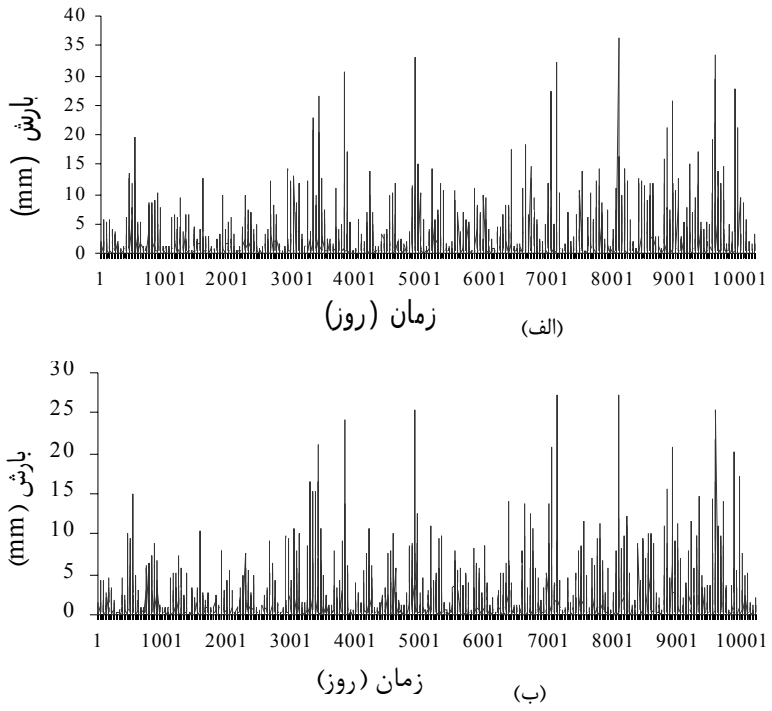
حوضه	Bias(mm/yr)	D	Q(mm/yr)	P(mm/yr)
کل کسیلیان	-۲/۴۵	۰/۴۳	۲۶۴	۸۱۹
معرف کسیلیان	-۵/۷	۰/۱۵	۲۳۱	۳۷۱



شکل ۸- ارزیابی مدل در سال آبی ۷۱-۱۳۷۰ در حوضه معرف



شکل ۹- ارزیابی مدل در سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ در حوضه کل کسیلیان



شکل ۱۰- بارش روزانه که در ایجاد جریان رودخانه حوضه کسیلیان (الف) و حوضه معرف (ب) مشارکت داشته‌اند

در شکل (۱۰) نیز میزانی از بارش که در ایجاد جریان رودخانه حوضه آبخیز کسیلیان و حوضه معرف در دوره ارزیابی نقش داشته نشان داده شده است. در شکل‌های زیر جریان بر حسب مترمکعب بر ثانیه، زمان بر حسب روز و بارش بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به مقادیر حاصل از دو پارامتر D و ARPE در مرحله کالیبراسیون و ارزیابی مدل می‌توان چنین بیان کرد که مدل هیدرولوژیکی IHACRES در حوضه آبخیز کسیلیان جریان را با دقت بیشتری نسبت به حوضه معرف کسیلیان شبیه‌سازی نموده است، این نتیجه با نتایج حاصل از اجرای مدل SWRRB به منظور شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبخیز کسیلیان توسط امیری و همکاران (۱) مطابقت دارد. با نگاهی به نتایج حاصل از دو مرحله کالیبراسیون و ارزیابی می‌توان دریافت نتایج ارزیابی مدل در هر دو حوضه ضعیف‌تر از نتایج واسنجی مدل بوده که این نتیجه با نتایج کروک و جیکمن (۱۵) مطابقت دارد. در مجموع در بخش‌هایی از طول دوره نتایج مدل رضایت‌بخش بود و در دوره‌هایی نیز روند شبیه‌سازی خوب نبوده است که این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که مدل به طول دوره کالیبراسیون حساس می‌باشد (۱۲). با استناد به نتایج جدول شماره (۱) و مقادیر حاصل از پارامتر δ در دو حوضه آبخیز کسیلیان و حوضه معرف مشخص می‌شود که مدل تأخیر بین بارش حوضه و جریان ناشی از آن را در دوره واسنجی صفر محاسبه نموده، یعنی بین بارش و جریان تأخیری مشاهده نشده است. مقادیر مثبت و منفی Bias به ترتیب بیانگر کمتر و بیشتر بودن متوسط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی است (۱۲). با استناد به این نکته مشخص می‌شود که مدل در دوره کالیبراسیون در حوضه آبخیز کسیلیان جریان را کمتر از جریان مشاهداتی، شبیه‌سازی نموده ولی در دوره ارزیابی بالعکس جریان را بیش از جریان مشاهداتی شبیه‌سازی کرده است. همچنین در دوره واسنجی و ارزیابی حوضه معرف متوسط جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل بیشتر از میانگین جریان مشاهداتی بوده است. در مجموع میتوان بیان کرد که مدل IHACRES در حوضه آبخیز کسیلیان و حوضه معرف، به طور متوسط جریان را بیش از واقعیت، شبیه‌سازی نموده است. با توجه به جدول (۲) بیشترین انحراف بین مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (Bias=۱۵۷/۴) در دوره واسنجی حوضه آبخیز کسیلیان مربوط به سال آبی ۵۳-۱۳۵۲ می‌باشد. مقادیر Bias بدست آمده برای حوضه آبخیز کسیلیان کمتر از حوضه معرف بوده به عبارت دیگر میزان خطا در حجم جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل در حوضه کسیلیان کمتر از میزان خطای کل در حجم جریان شبیه‌سازی شده در حوضه معرف بوده که این نیز خود حاکی از دقت بیشتر مدل در شبیه‌سازی جریان حوضه کسیلیان نسبت به حوضه معرف می‌باشد. طبق نتایج تحقیق میزانی از بارش که در ایجاد جریان رودخانه حوضه آبخیز کسیلیان مشارکت داشته به طور متوسط برای کل دوره آماری مورد استفاده حدود یک سوم کل بارش حوضه (یعنی ۵۴۵ میلی‌متر در سال) و در حوضه معرف کسیلیان میزانی از بارش که به جریان رودخانه پیوسته ۴۴۷ میلی‌متر در سال بوده است. به عبارت دیگر حدود یک سوم بارش حوضه کل کسیلیان و بیش از نصف بارش حوضه معرف در بخش اول مدل (یعنی بخش تلفات) به بارش مؤثر تبدیل و سرانجام به جریان رودخانه وارد شده و مابقی بارش با فرض غیرقابل نفوذ بودن حوضه به صورت تبخیر و تعرق از بین رفته است.

سپاسگزاری

در انتها از جناب آقای دکتر کروک عضو هیئت علمی دانشگاه ملی استرالیا که راهنمائیهای ایشان در انجام هر چه بهتر تحقیق موثر بوده و همچنین از اساتید محترم راهنما و مشاور صمیمانه تشکر و قدردانی مینمایم.

منابع

۱- امیری م.، قنبرپور م.ر.، ضیاءتبار احمدی م.خ. و محسنی ساروی م. ۱۳۸۷. واسنجی و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی *SWRRB* به منظور شبیه‌سازی رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کسیلیان). مجله منابع طبیعی ایران. شماره ۴: ۷۹۷-۸۰۸.

۲- شریفی ف.، صفار پور ش. و ایوب زاده س.ع. ۱۳۸۳. ارزیابی مدل رایانه‌ای *AWBM2002* در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی تعدادی از حوضه‌های آبخیز ایران. پژوهش و سازندگی. شماره ۶۳: ۴۲- ۳۵.

۳- علیزاده ا. ۱۳۸۰. اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ سزدهم. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۷۳۵ ص.

۴- مرکز تحقیقات منابع آب. ۱۳۷۵. گزارش تلفیق مطالعات منابع آب حوضه آبریز رودخانه‌های مازندران. جلد دوم (بررسی‌ها و مشخصات عمومی).

5- Anderson R.M., Hobbs B.F., and Koonce J.F. 2006. Modeling effects of forest cover reduction on larva walleye survival in Lake Erie Tributary spawning basins. Ecosystems, 9:725-739.

6- Astatkie T., and Watt W.E. 1988. Multiple-input transfer function modeling of daily Streamflow series using non-linear inputs. Water Resources Research. 34: 2717-2725.

7- Box G.E.P., and Jenkins G.M. 1970. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day, San

Francisco.230p.
8- Carla Carcano E., Bartolini P., Muselli M., and Piroddi L. 2008. Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modelling daily streamflows. Journal of Hydrology. 362: 291– 307.
9- Croke B.F.W. and Jakeman A.J. 2004. A catchments moisture deficit module for the IHACRES rainfall–runoff model. Environmental Modeling and Software. 19:1–5.
10- Croke B.F.W. and Littlewood I.G. 2005. Comparison of alternative loss modules in the IHACRES model: an application to 7 catchments in Wales. In Zerger A. and Argent R.M.(eds) MODSIM 2005 International Congress on Modeling and Simulation. Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand. 2005:2904-2910.
11- Croke B.F.W., Andrews F., Jakeman A.J., Cuddy S.M., and Luddy A. 2005a. Redesign of the IHACRES rainfall runoff model. In: Proceedings of the 29th Hydrology and Water Resources Symposium. Engineers Australia.
12- Croke B.F.W., Andrews F., Spate J., and Cuddy S.M. 2005b. IHACRES User Guide. Technical Report 2005/19, second ed. ICAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra. 39p. http://www.toolkit.net.au/ihacres
13- Croke B.F.W., Letcher R.A., and Jakeman A.J. 2006. Development of a distributed flow model for underpinning assessment of water allocation options in the Naomi River Basin, Australia. Journal of Hydrology. 319:51–71.
14- Croke B.F.W., Andrews F., Jakeman A.J., Cuddy S.M., and Luddy A. 2006. IHACRES Classic Plus: A redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. Environment Modelling & Software. 21: 426-427.
15- Croke B.F.W., and Jakeman A.J. 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semi arid regions. In: Wheatear, H.S. Sorooshian, S. Sharma, K.D.(Eds.): Hydrological Modeling in Arid and Semi-arid Areas. Cambridge University Press, Cambridge. 41-48.
16- Dooge J.C.I. 1973. Linear Theory of Hydrologic Systems. Technical Bulletin No 1468. United States Department of Agriculture, Washington DC. 327.
17- Dye P.J., and Croke B.F.W. 2003. Evaluation of Streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. Environmental Modelling & Software. 18: 705–712.
18- Jakeman A.J., and Hornberger G.M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall runoff model? Water Resources Research. 29: 2637-2649.
19- Jakeman A.J., Littlewood I.G., and Whitehead P.G. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. Journal of Hydrology. 117: 275-300.
20- Kisi O. 2004. River flow Modeling using Artificial Neural Networks. J. Hydrologic Engrg. ASCE 9: 60-63 .
21- Littlewood I.G., and Jakeman A.J. 1994. A new method of rainfall runoff modeling and its application in catchments hydrology. In: Zannetti, P. (Ed.) Environmental Modelling, vol. II. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 143-171.
22- Littlewood I.G., Down K., Parker J.R., and Post D.A. 1997. IHACRES Catchment-scale rainfall-streamflow modelling (PC version). Center for Ecology and Hydrology, The Australian National University. 95p.
23- Littlewood L.G., Clarke R.T., Collischonn W., and Croke B.F.W. 2007. Predicting daily Streamflow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. Environmental Modelling and Software. 22: 1229-1239.
24- Post D.A., and Jakeman A.J. 1999. Predicting the daily Streamflow of Ungauged catchments in S.E. Australia by regionalizing the parameters of a lumped conceptual rainfall-runoff model, Ecological Modeling.123:91p.
25- Post D.A., Jones J.A., and Grant G.E. 1998. An improved methodology for predicting the daily hydrologic response of ungauged catchments, Environmental Modeling and Software. 13: 395-403.
26- Sefton C.E.M., and Howarth S.M. 1998. Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. J. hydrology. 211: 1-16.
27- Ye W., Bates B.C., Viney N.R., Sivapalan M., and Jakeman A.J. 1997. Performance of conceptual rainfall–runoff models in low-yielding ephemeral catchments. Water Resources Research. 33: 153-166.

Journal of Water and Soil
Vol. 25, No. 1, Mar-Apr 2011, p. 104-114

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۵، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۰، ص. ۱۱۴-۱۰۴

Calibration and Evaluation of IHACRES Hydrological Model for Daily Flow Simulation

M. Zarei[1*]- M. Habibnezhad Roshan[2]- K. Shahedi[3]- M.R. Ghanbarpour[4]

Received:6-3-2010
Accepted:21-11-2010

Abstract

Major of hydrological systems are very complicated and it is not possible to understand them completely, therefore simplification is necessary to understand or control of a part of the system behavior such as water balance relationships. Hydrological models are simple structure of complicated systems in water cycle in the nature. The first goal of a hydrological model is function predict of complicated system and survey the impact of any kind of changes on system behavior. In this research *IHACRES* hydrological model was used to daily flow simulation and calculation of rainfall measure that be increase into streamflow, in the kasilian catchment (Area=342.86 km^2) and kasilian sub catchment (Area=67.8 km^2). The results was representative of delay naught between rainfall and flow in two catchments, also to values of two parameter coefficient of determination (*D*) and average relative parameter error (*ARPE*), the model streamflow in kasilian catchment more accuracy simulated than kasilian sub catchment. Altogether, in attention to values of error in flow volume (*Bias*), average of simulated streamflow by *IHACRES* model was more than observed streamflow in these catchments. Percentage of rainfall that bears hand to streamflow creation of kasilian catchment was calculated near third of catchment rainfall average and in the kasilian sub catchment for evaluation and calibration period 231 and 216 mm/yr, respectively.

Keywords: Hydrological Model, IHACRES, Calibration, Evaluation

1,2,3,4- Farmer MSc Student, Associate Professor and Assistant Professors, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Science and Natural Resources, Respectively
(*-Corresponding Author Email: mehdizareii2007@gmail.com)