نشریه دانش آب و خاک / جلد 26 شماره 2/1 صفحه‌های 29 تا 42/ سال 1395

ارزیابی کارایی مدل‌های SWAT و IHACRES در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز خرم‌آباد

محمد گلشن[1]، اباذر اسمعلی‌عوری[2*]، کاکا شاهدی[3]، افشین جهانشاهی[4]

تاریخ دریافت: 94/02/06 تاریخ پذیرش: 94/11/12

[1-4]- دانشجویان دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

[2]- دانشیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

[3]- دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

[*]مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: esmaliouri@uma.ac.ir

چکیده

مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه‌های آبخیز از نظر مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه، سازه‌های کنترل سیل و ذخیره آن اهمیت ویژه‌ای دارد. تنوع این مدل‌ها انتخاب مناسب‌ترین مدل با توجه به اهداف موردنظر را دشوار می‌کند. در این تحقیق از مدل یکپارچه IHACRES و مدل نیمه‌توزیعی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز خرم‌آباد با مساحت 2467 کیلومترمربع استفاده شد. بعد از هم‌پوشانی لایه‌ها، 232 واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) برای حوضه آبخیز به‌دست آمد. در شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل SWAT از الگوریتم SUFI2 برای تحلیل حساسیت پارامترها، واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. دوره زمانی 2004 تا 2008 برای واسنجی و دوره زمانی 2009 تا 2010 برای صحت‌سنجی استفاده شد. ارزیابی کارآیی مدل با استفاده از ضرایب تبیین (R^2)، نش-ساتکلیف (NS)، رگرسیون خطی (bR^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام شد. مقدار این ضرایب در مدل یکپارچه به‌ترتیب 0/72، 0/53، 0/36 و 0/15 مترمکعب بر ثانیه و در مدل نیمه‌توزیعی به ترتیب 0/66، 0/63، 0/44 و 0/17 مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمد. نتایج نشان داد که علی‌رغم ساده بودن مدل یکپارچه دقت آن نزدیک به مدل پیچیده نیمه‌توزیعی هست و هر دو مدل برای کاربرد در منطقه مناسب هستند. بنابراین با توجه به در دسترس بودن اطلاعات می‌توان از این مدل‌ها به‌منظور شبیه‌سازی رواناب منطقه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، رواناب، خرم‌آباد، IHACRES، SUFI2، SWAT

Performance Evaluation of SWAT and IHACRES Models to Simulate Runoff in Khorramabad Watershed

M Golshan[1], A Esmali Ouri[2*], K Shahedi[3], A Jahanshahi[4]

Received: 26 April 2015 Accepted: 01 February 2016
[1-4] Ph.D. Students, Dept. of Watershed Eng., Faculty of Natural Resources, Sari Agriculture & Natural Resource University, Iran
[2] Associate Prof., Dept. of Watershed Eng., Faculty of Agricultural Technology & Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran
[3] Associate Prof., Dept. of Watershed Eng., Faculty of Natural Resources, Sari Agriculture & Natural Resource University, Iran
[*] Corresponding Author, Email: esmaliouri@uma.ac.ir

Abstract

Rainfall-runoff modeling in watersheds plays an important role in water resources management, river engineering, flood storage and designing control structures. Diversity of available models makes it difficult to choose the most appropriate model for certain objectives. In this research, two models, namely a lumped model (IHACRES) and a semi-distributed model (SWAT) were applied to simulate runoff in Khorramabad watershed. After overlapping maps, 232 Hydrologic Response Units (HRU) were obtained. Sensitivity analysis, calibration and validation purposes of SWAT were performed using SUFI2 algorithm for runoff simulation. For calibration and validation of the models, time periods of years 2004-2008 and 2009-2010 were used, respectively. Effectiveness evaluations of the models were conducted using R^2, NS, bR^2 and RMSE coefficients. Obtained values of this coefficient for the lumped model were equal to 0.72, 0.53, 0.36 and 0.15 $m^3\ s^{-1}$ and for the semi-distributed model were 0.66, 0.63, 0.44 and 0.17 $m^3\ s^{-1}$, respectively. The results showed that in spite of simplicity of the lumped model, its performance was near to semi-distributed model, so that, both the models were suitable for using in the studied watershed. Therefore we can use these models for simulating hydrographs in the same areas with respect to availability of data.

Keywords: IHACRES, Khorramabad, Runoff, Simulation, SUFI2, SWAT

مقدمه

ارزیابی دقیق دبی جریان اثرات اقتصادی چشمگیری دارد، به‌طوری‌که در مسائل مربوط به مدیریت منابع آب، کنترل آلودگی، طرح‌های مهندسی آب، مصارف کشاورزی، خسارت ناشی از سیل و حفظ و بهره‌وری مناسب از منابع طبیعی ضروری به‌نظر می‌رسد (کیسی 2004). مدل‌سازی بارش-رواناب در علوم هیدرولوژی از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های نوین در مدل‌سازی و نرم‌افزارهای موجود باعث افزایش سرعت و کاهش زمان اجرای محاسبات گردیده، به‌طوری‌که پژوهش‌ها و مطالعات مربوط به مسائل آب از دهه 1950 به‌گونه چشمگیری افزایش یافته است (بوگوتون 2006، یانگ و گارنیر 2006، کروک و همکاران 2006). قابلیت و استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژی شامل موارد مختلفی از جمله ارزیابی و تخمین اثرات هیدرولوژی در تغییر پوشش و مدیریت زمین (کروک و همکاران 2003)، بررسی اثرات هیدرولوژی نوسانات اقلیمی (زو و همکارن 2015)، تحقیقات اکولوژی (کلوزن و بیگز 2000) و تحقیقات کیفیت آب (لتچر و همکاران 2002) هست. به‌طورکلی مدل‌ها بر اساس فرآیندهای شبیه‌سازی فیزیکی، همانند الگوریتم‌ها، محاسبات توصیفی فرآیندها، اصول ساخت و فنون به‌کار رفته در سه گروه مدل‌های تجربی[1]،

[1] Empirical models

مفهومی[2] و فیزیکی[3] طبقه‌بندی می‌شوند (سوپس 1961). همچنین طبقه‌بندی پیوسته و ناپیوسته، یکپارچه و توزیعی (کارکانو و همکاران 2008) رایج هست. انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از کمینه اطلاعات ورودی موردنیاز، پیش‌بینی با دقت قابل قبولی را ارائه کند، امری ضروری به‌نظر می‌رسد (شریفی و همکاران 1383). کاندرلیک[4] (2003) چهار معیار: (1) خروجی‌های موردنیاز مدل برای اهداف موردنیاز، (2) فرآیندهای هیدرولوژیکی مختلف که برای اهداف مطرح‌شده نیاز به مدل‌سازی هست، (3) در دسترس بودن داده‌های ورودی و (4) ارزش را برای انتخاب یک مدل هیدرولوژیکی پیشنهاد نموده است. مدل مفهومی، اجزاء هیدرولوژیکی را از طریق ساده‌سازی مفاهیم فیزیکی مرتبط با چرخه هیدرولوژیکی توصیف می‌کند (سریونگستانون و تاسومبات 2011). مدل‌های مختلفی با این مفهوم توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به سرویس حفاظت خاک (SCS) توسعه‌یافته به‌وسیله USDA (1972)، NAM (نیلسون و هانسن 1973)، TANK (سوگاوار 1974)، HEC-HMS (مرکز مهندسی هیدرولوژیکی 2000)، SWAT (نیتچ و همکاران 2005)، TOPMODEL (بیون و همکاران 1995) و IHACRES[5] (کروک و همکاران 2003) اشاره کرد. مدل IHACRES یک مدل مفهومی یکپارچه است که شامل مدل کاهشی غیرخطی و مدل روندیابی خطی است. علی‌رغم توسعه نسبتاً اخیر IHACRES، این مدل در بین مدل‌های هیدرولوژیکی به‌سرعت و به‌طور وسیع مورد استقبال محققان قرار گرفته است (سریونگستانون و تاسومبات 2011). تعداد پارامترهای به‌کار رفته در این مدل کم هست، درحالی‌که هم‌زمان در مقایسه با مدل‌های توزیعی سعی شده جزئیات بیشتری از فرآیندهای داخلی ارائه شود (کروک و همکاران 2005). این مدل در مناطق مختلف دنیا شامل استرالیا (کارلیل و همکاران 2004)، تایلند (تاسومبات و سریونگستانون 2010)، شمال آفریقا (دی و کروک 2003) و ایران (زارعی و همکاران 1390) به‌منظور بررسی پاسخ هیدرولوژیکی به‌طور موفقیت‌آمیزی مورداستفاده قرار گرفته است. وازی و همکاران (2010) چهار مدل یکپارچه SMARG، SACRAMENTO، SIMHYD و IHACRES را به‌منظور ارزیابی تغییر اقلیم بر روند هیدرولوژیکی 61 حوضه در جنوب شرق استرالیا به‌کار بردند. نتایج نشان داد که مدل IHACRES مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد. ابزار ارزیابی آب‌وخاک (SWAT[6]) یک مدل مفهومی نیمه‌توزیعی است که به‌عنوان ابزاری مؤثر در مطالعه هیدرولوژی حوضه در سطح جهان شناخته شده است (فیسکلین و همکاران 2013). علاوه بر آن چندین مزیت مدل SWAT مانند تهیه رایگان مدل، امکان ویرایش اطلاعات، شبیه‌سازی متغیرهای مختلف با توجه به تغییر کاربری، قابلیت الحاق به GIS (سیستم اطلاعات جغرافیایی) از دلایل انتخاب این مدل هست (آرنولد و همکاران 2012). مدل SWAT در سال‌های اخیر در مناطق مختلف کشور به‌کار رفته که عملکرد آن در این مناطق قابل‌قبول گزارش شده است (باستانی اله‌آبادی و همکاران (1391) در حوضه آبخیز کردان، ابراهیمی (1390) در حوضه آبخیز دویرج، گلشن و همکاران (1394) در حوضه آبخیز هراز).

مدل‌های هیدرولوژیکی بر اساس درجه پیچیدگی، فرآیندهای در نظر گرفته شده، داده‌های موردنیاز برای واسنجی و نحوه کاربرد مدل، متفاوت هستند. مدلی به‌عنوان بهترین مدل برای همه کاربردها وجود ندارد، بلکه مناسب‌ترین مدل برای یک کاربرد خاص بایستی با توجه به هدف در نظر گرفته‌شده و نیز بر اساس خصوصیات حوضه آبخیز تحت بررسی انتخاب گردد. در این تحقیق، مدل یکپارچه IHACRES و مدل توزیعی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز خرم‌آباد

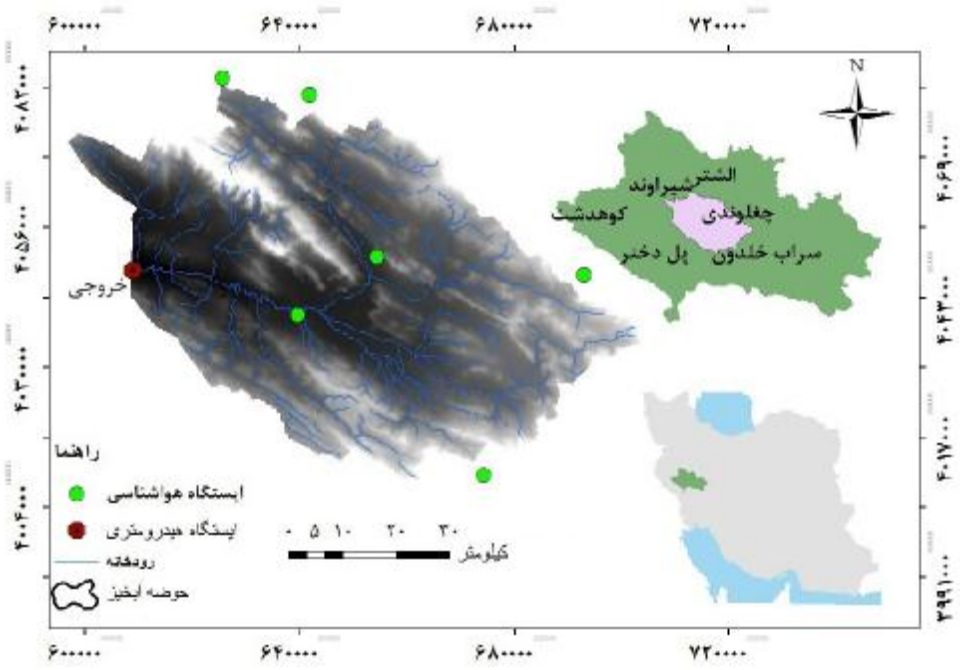
[2] Conceptual models
[3] Physical basic models
[4] Cunderlike
[5] Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow Data
[6] Soil and Water Assessment Tools

مورداستفاده قرار گرفت است تا توانایی این مدل‌ها در شبیه‌سازی دبی جریان و زمان وقوع دبی بیشینه مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

حوضه آبخیز خرم‌آباد با مساحت 2467 کیلومترمربع و با محیط 339 کیلومتر یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز کرخه هست که در مرکز استان لرستان واقع شده است (شکل 1). این حوضه در محدوده جغرافیایی 48 درجه و 21 دقیقه تا 49 درجه و 8 دقیقه طول شرقی و 33 درجه و 13 دقیقه تا 33 درجه و 44 دقیقه عرض شمالی واقع شده است. کمینه ارتفاع از سطح دریا 1102 متر و بیشینه ارتفاع از سطح دریا 2545 متر هست. متوسط بارش سالیانه حوضه رودخانه خرم‌آباد 430 میلی‌متر است. این رودخانه پس از عبور از شهر خرم‌آباد و دشت جنوبی آن و پس از دریافت آب از شاخه‌های فرعی مختلف در نهایت به رودخانه کشکان و سپس به رودخانه سیمره می‌ریزد.



شکل 1- موقعیت منطقه و ایستگاه‌های موردمطالعه.

تهیه داده‌های ورودی به مدل

اطلاعات مکانی موردنیاز برای مدل نیمه‌توزیعی SWAT شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع[7]، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشند که هر سه این نقشه‌ها با اندازه سلول 28 متری تهیه‌شده و در قالب لایه‌های رستری به مدل معرفی شد. مدل برای شناسایی خصوصیات ظاهری و تشخیص محل آبراهه‌ها و نیز زیرحوضه‌ها از نقشه مدل رقومی ارتفاع استفاده می‌نماید. اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، درجه حرارت کمینه، درجه حرارت بیشینه و رطوبت نسبی در مقیاس زمانی روزانه از 6 ایستگاه هواشناسی در داخل حوضه تهیه شد (جدول 1). برای مدل IHACRES داده‌های بارندگی و دمای روزانه ایستگاه‌های هواشناسی با توجه به خصوصیات فیزیوگرافی حوضه و مناسب بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی با استفاده از روش تیسن میانگین‌گیری شده

[7] Digital Elevation Model (DEM)

و به‌عنوان متغیر ورودی وارد مدل شده‌اند. مدل SWAT برای شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی حوضه به آمار و اطلاعات بلندمدت یک ایستگاه سینوپتیک در حوضه یا در نزدیکی حوضه نیاز دارد که برای این منظور از آمار 30 ساله ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد استفاده شد.

جدول 1- داده‌های ورودی به مدل SWAT.

اطلاعات	تشریح	منبع
جریان رودخانه	ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد (خروجی زیرحوضه 10)	شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان
هواشناسی	بارندگی، دما و رطوبت نسبی ایستگاه‌های چم‌انجی، دهنو، کاکارضا، خرم‌آباد، سراب‌سی و سرخاب	سازمان هواشناسی کشور
نقشه رقومی ارتفاع	28 متری	سازمان نقشه‌برداری کشور
کاربری اراضی	11 نوع کاربری اراضی	شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان
نقشه خاک	31 نوع واحد خاک	اداره منابع طبیعی استان لرستان

اجرای مدل هیدرولوژیکی IHACRES

IHACRES مخفف تشخیص هیدروگراف واحد و اجزاء جریان ناشی از بارندگی، تبخیر و تعرق و دبی جریان هست. مدل IHACRES یک مدل بارش رواناب در مقیاس حوضه آبخیز است که با هدف تشخیص رابطه بین بارش و رواناب توسعه داده شده است (سریونگستانون و تاسومبات 2011). چارچوب مدل‌سازی IHACRES بر یک ساختار دو جزئی مبتنی است: بخش محاسبه رطوبت خاک (SAM) و بخش روندیابی و یا هیدروگراف واحد. مدل SAM بارش و درجه حرارت را به بارش مؤثر تبدیل می‌کند. بخش روندیابی بارش مؤثر را به جریان تبدیل می‌کند. در مدل غیرخطی، رابطه 1 به‌منظور محاسبه بارش مؤثر (u_k) برحسب میلی‌متر مورداستفاده قرار گرفت (یی و همکاران 1997):

$$u_k = [c(\Phi_k - l)]^p r_k \quad [1]$$

در رابطه 1، c ضریب تعادل حجم بارش، l آستانه شاخص رطوبت خاک، p فاکتور واکنش غیرخطی و r_k بارش مشاهداتی بر حسب میلی‌متر هست. Φ_k شاخص رطوبت خاک است که با استفاده از رابطه 2 محاسبه شد. در رابطه 2، T_k پارامتر شدت خشکی خاک می‌باشد.

$$\Phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{T_k}\right)\Phi_{k-1} \quad [2]$$

در مدل خطی تبدیل بارش مؤثر به رواناب با استفاده از روابط خطی محاسبه شد. دو مؤلفه در روندیابی جریان سریع و آهسته وجود دارد. این مؤلفه‌ها می‌توانند به‌صورت موازی و یا سری متصل باشند. در مطالعات انجام‌شده توصیه‌شده تا دو فرآیند به‌صورت موازی استفاده شود، به‌جز در مناطق نیمه‌خشک یا مناطقی که دارای جریان پایه فصلی هستند (یی و همکاران 1997). ترکیب مؤلفه‌های جریان سریع $X_k^{(q)}$ و آهسته $X_k^{(s)}$ منجر به تولید رواناب X_k می‌شود که طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند (یی و همکاران 1997):

$$X_k = X_k^q + X_k^s \quad [3]$$

$$X_k^{(q)} = -\alpha_q X_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad [4]$$

$$X_k^{(s)} = -\alpha_s X_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \quad [5]$$

که α_q، β_q پارامترهای ثابت زمانی برای جریان سریع و α_s، β_s پارامترهای ثابت زمانی برای جریان آهسته هستند. محاسبه پاسخ دینامیک هیدروگراف (DRCs) برای جریان سریع و آهسته در روابط زیر ارائه شده است:

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad [6]$$

[8] Dynamic Response Characteristics

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad [7]$$

که در آن Δ گام زمانی، τ_q و τ_s ثابت زمانی افت جریان روزانه سریع و آهسته هست. حجم نسبی جریان سریع و جریان آهسته با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V_q = 1 - V_s = \frac{\beta_q}{1+\alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+\alpha_s} \quad [8]$$

که، V_q نسبت جریان سریع به جریان کل $(1 - V_s)$ و V_s حجم نسبی از جریان آهسته است.

اجرای مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT یک مدل مفهومی- نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه است که دارای بازده محاسباتی بالایی هست. این مدل به‌صورت پیوسته زمانی هست، که در گام‌های زمانی متفاوتی به‌صورت ساعتی، روزانه و یا طولانی‌مدت اجرا می‌شود (نیتچ و همکاران 2005). چرخه هیدرولوژیکی که در این مدل شبیه‌سازی می‌شود بر - اساس بیلان آبی است که به‌صورت معادله زیر هست (ین و همکاران 2015):

[9]

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^{t}(R_d - Q_{su} - E_a - W_{se} - Q_{gw})$$

در این رابطه، SW_t: مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، t: زمان (روز)، SW_o: مقدار آب موجود در خاک (میلی‌متر)، R_d: مقدار بارش در روز iام (میلی‌متر)، Q_{su}: مقدار رواناب سطحی در روز iام (میلی‌متر)، E_a: مقدار تبخیر- تعرق واقعی در روز iام (میلی‌متر)، W_{se}: مقدار آب نفوذ کرده به منطقه قشری در پروفیل خاک (میلی‌متر) و Q_{gw}: مقدار جریان آب زیرزمینی در روزiام (میلی‌متر) هست.

واسنجی کردن مدل توزیعی یا نیمه‌توزیعی برای یک حوضه آبخیز، فرآیندی پیچیده است (لرات و همکاران 2012). زیاد بودن تعداد پارامترها، هم‌پوشانی پارامترها، عدم‌قطعیت و عدم توانایی تشخیص مسئله در این موضوع تأثیرگذار هست (بیون 2001، گوتزینگر و باردوسی 2007، کیرچنر 2006). در این مطالعه، مدل Arc-SWAT2012 که مختصراً SWAT نامیده می‌شود به نرم‌افزار ArcGIS الحاق شد و به‌منظور شبیه‌سازی دبی جریان مورداستفاده قرار گرفت. این مدل به‌طور رایگان از وب‌سایت رسمی SWAT به نشانی: http;//swat.tamu.edu/software/arcswat/ تهیه شد. به‌طورکلی اجرای مدل SWAT شامل پنج مرحله اصلی هست: (1) آماده‌سازی اطلاعات (2) تشریح حوضه (3) تعریف HRU (4) ارزیابی حساسیت پارامترها (5) واسنجی و صحت‌سنجی.

به‌منظور ارزیابی حساسیت پارامترها، واسنجی و صحت‌سنجی مدل از برنامه SWAT-CUP توسعه داده‌شده توسط عباسپور و همکاران (2007) استفاده شد. اطلاعات جزئی‌تر و فرآیند ایجاد برنامه SWAT-CUP در مطالعه عباسپور (2012) در دسترس هست. الگوریتم یکپارچه عدم قطعیت متوالی (SUFI2) که یک روش مدل‌سازی معکوس نیمه‌اتوماتیک در داخل برنامه SWAT-CUP است، برای شبیه‌سازی انتخاب شد. زیرا از قابلیت مناسبی در تغییر و ارزیابی تعداد زیادی از پارامترها در کمترین تعداد تکرار مدل برخوردار هست (یانگ و همکاران 2008).

دوره زمانی شبیه‌سازی و ارزیابی مدل

با تجزیه‌وتحلیل آمار هیدرومتری و هواشناسی ایستگاه‌ها، دوره سال‌های 2004 تا 2010 به‌طور مشترک برای شبیه‌سازی مدل‌ها انتخاب شدند. دوره 2004 تا 2008 برای واسنجی مدل و دوره 2009 تا 2010 برای صحت‌سنجی مدل‌ها انتخاب شد. برای ارزیابی کارآیی مدل و محدود کردن جواب‌ها به‌سمت جواب یگانه، گاهی لازم است چندین معیار آماری مورداستفاده قرار گیرد (گاسمن و همکاران 2007، سانتی و همکاران 2001). در این پژوهش، ارزیابی مدل به کمک ضریب NS، R^2، bR^2 و RMSE انجام شد (جدول 2). بنابراین ابتدا داده‌های

اندازه‌گیری در باند تخمین عدم قطعیت 95% (95PPU[9]) قرار می‌گیرند، سپس در هر مرحله، پارامترهای قبلی تصحیح‌شده و فاصله اطمینان 95 درصد پارامترها بر اساس ماتریس همبستگی کاهش می‌یابد و عدم قطعیت در گام‌های متوالی کاهش می‌یابد. در جدول 2 معیارهای ارزیابی مورداستفاده در این مطالعه ارائه‌شده‌اند که در آن n تعداد مشاهدات، Q_i^{obs} و Q_i^{sim} مقادیر متناظر مشاهده و پیش‌بینی‌شده، $\bar{Q}_i^{obs}$ و $\bar{Q}_i^{sim}$ نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش‌بینی‌شده و b شیب‌خط رگرسیونی است.

جدول 2- معیارهای آماری مورداستفاده برای ارزیابی کارآیی مدل.

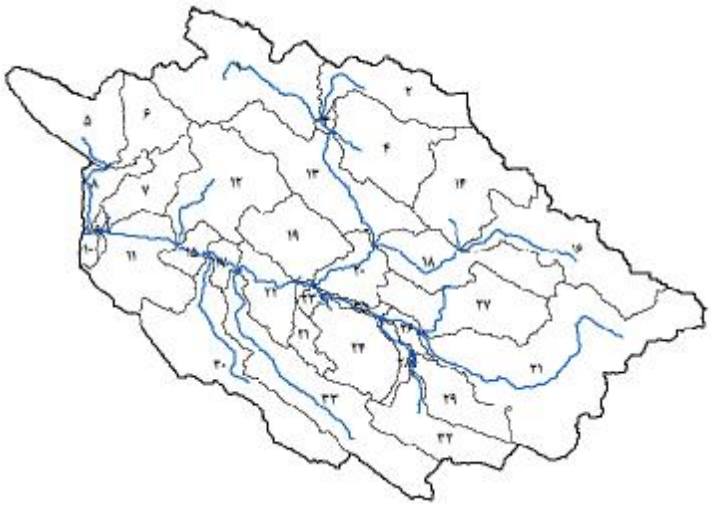
معیار	فرمول	محدوده	مقدار برای حالت بدون خطا
ضریب تبیین	$R^2=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{sim}-\bar{Q}_i^{sim})(Q_i^{obs}-\bar{Q}_i^{obs})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{sim}-\bar{Q}_i^{sim})^2\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{obs}-\bar{Q}_i^{obs})^2}$	[0 ;1]	R^2=1
ضریب نش-ساتکلیف	$NS=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{obs}-Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{obs}-\bar{Q}^{obs})^2}\right]$	[-∞ ;1]	NS= 1
ضریب رگرسیون	$bR^2=\begin{cases}\|b\|R^2 if \|b\|\le 1\\ \|b\|^{-1}R^2 if \|b\|>1\end{cases}$	[0 ;1]	bR^2= 1
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{obs}-Q_i^{sim})^2}{n}}$	[0 ;+∞]	RMSE<1

نتایج و بحث

واسنجی مدل نیمه‌توزیعی SWAT

اولین گام در تولید پروژه SWAT برای یک منطقه، مشخص کردن محدوده حوضه آبخیز است. در نتایج حاصل از این مرحله حوضه آبخیز خرم‌آباد به 33 زیرحوضه تقسیم شد (شکل 2). که ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد در خروجی زیرحوضه شماره 10 قرار گرفته است. سپس واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) بر اساس نقشه‌های ورودی مشخص شد به‌طوری‌که هر HRU دارای کاربری اراضی، نوع خاک و شیب مشترک هست (نیتچ و همکاران 2005). کاربری اراضی دیم با 47 درصد، بافت خاک از نوع شنی-رسی-لومی با 51 درصد و شیب 12 تا 30 درصد با 32 درصد از مساحت حوضه آبخیز غالب می‌باشند. با هم‌پوشانی این لایه‌ها 232 واحد پاسخ هیدرولوژیکی ایجاد شد. نتایج ارزیابی حساسیت نسبی در طول واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI2 نشان داد که 7 پارامتر از حساسیت بالایی برخوردار هست. این پارامترها برای واسنجی مدل انتخاب شدند (جدول 3). در الگوریتم SUFI2 صفر بودن مقادیر p-value نشان‌دهنده حساسیت بالای این پارامترها هست که با بالا بودن مقدار قدر مطلق t-state، مقدار حساسیت این پارامترها افزایش می‌یابد (کاویان و همکاران 1394). تغییر این پارامترها در طی تکرار فرآیند از تأثیرگذاری بیشتری در شبیه‌سازی دبی خروجی برخوردار می‌باشند (زو و همکاران 2015). بعد از واسنجی مدل با استفاده از پارامترهای حساس، محدوده کمینه و بیشینه برای هر پارامتر مشخص شد (جدول 3).

[9] Uncertainty Predication 95%



شکل 2- تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها در حوضه آبخیز خرم‌آباد با مدل SWAT.

جدول 3– نتایج ارزیابی حساسیت، بازه مقادیر و مقادیر بهینه پارامترها با استفاده از الگوریتم SUFI2.

پارامتر	توضیحات	t-Stat*	P-Value*	کمینه	بیشینه	بهینه
R**-CN	شماره منحنی	-51/4	0/00	-0/016	0/016	-0/335
V**-ALPHA_BNK	ضریب تخلیه کانال (day)	-12/8	0/00	-0/495	0/49	0/094
V-Rchrg_Dp	تغذیه آبخوان از سفره سطحی (%)	-9/3	0/00	-/495	0/49	0/056
R-SOL_BD	چگالی توده خاک ($gr\ cm^{-3}$)	-6/97	0/00	-/013	0/939	0/013
R-SFTMP	دمای هوا برای بارش برف (°C)	6/49	0/00	-0/005	4/581	0/049
V-CH_K2	هدایت هیدرولیکی مؤثر ($mm\ hr^{-1}$)	5/17	0/00	70/17	78/12	76/786
R-SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع ($mm\ hr^{-1}$)	-4/67	0/00	-0/0088	0/88	0/717

*بزرگی مقادیر قدر مطلق t-state و نزدیکی p-value به صفر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر پارامتر هست.

**R به‌معنای ضرب کردن مقادیر موجود پارامتر در (1+) مقدار داده شده است و V به‌معنای جایگزین کردن مقادیر موجود با مقدار داده شده است.

واسنجی مدل یکپارچه IHACRES

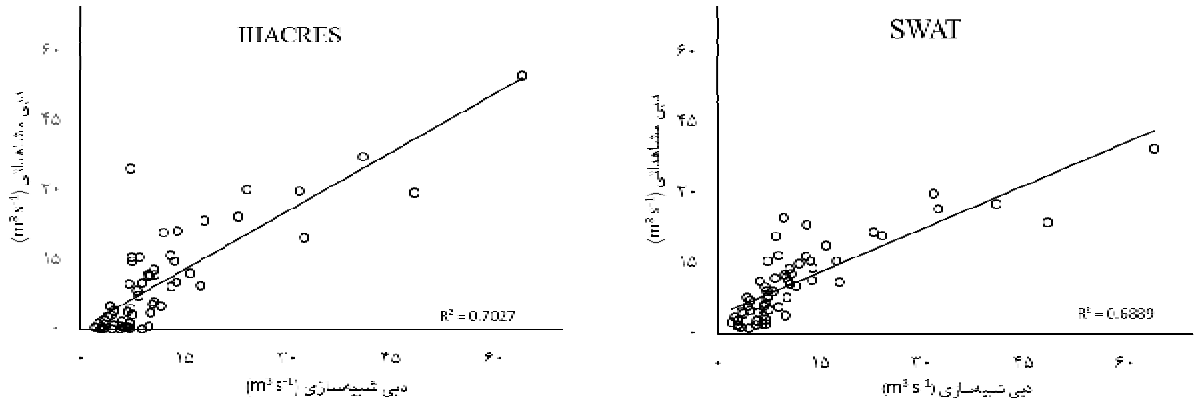
پس از اجرای مدل برای حوضه، انجام واسنجی با روش سعی و خطا با استفاده از آمار مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری انجام شد. چارچوب مدل‌سازی IHACRES بر اساس مدل‌های خطی و غیرخطی هست. مدل کاهشی غیرخطی، بارندگی (r_k) را به‌وسیله در نظر گرفتن نسبت نفوذ و تبخیر به بارش مؤثر (u_k) تبدیل می‌کند. به‌منظور به‌دست آوردن بارش مؤثر شاخص رطوبتی حوضه یا شاخص رطوبت پیشین، شاخص اشباع حوضه آبخیز برای هر گام زمانی محاسبه می‌شود (ابوشاندی و مرکل 2013).

جدول 4- نتایج واسنجی پارامترهای مدل IHACRES.

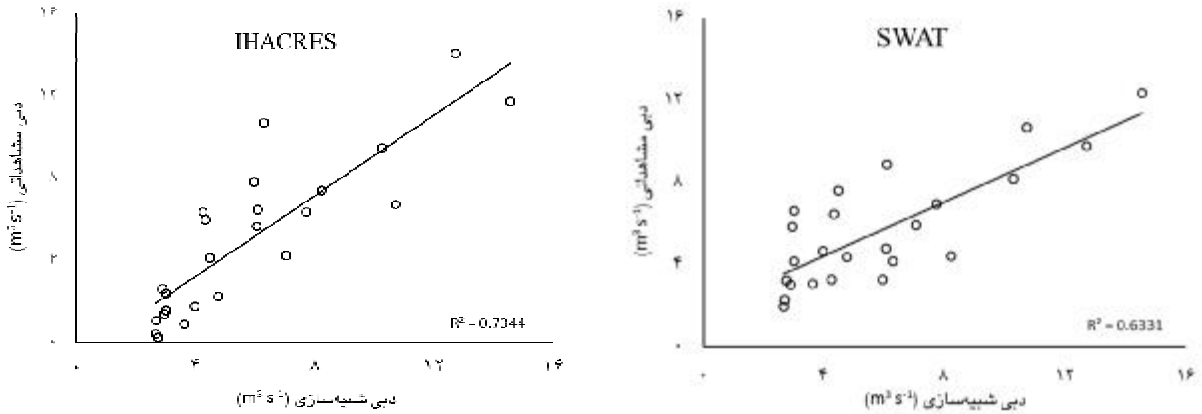
پارامتر	C	τ_w	F	I	P
توضیحات	ظرفیت ذخیره رطوبت	زمان خشک شدن	ضریب حرارت حوضه	ضریب آستانه رطوبت	شدت رطوبت خاک
مقدار	0/01	2	0/50	0/02	1
پارامتر	a(s)	B(s)	τ^s	v(s)	
توضیحات	ضریب خشکیدگی	شاخص پیک	کاهش جریان آهسته	نسبت حجم	
مقدار	0/02	0/02	37	1	

شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی (2004- 2008) **و صحت‌سنجی** (2009- 2010)

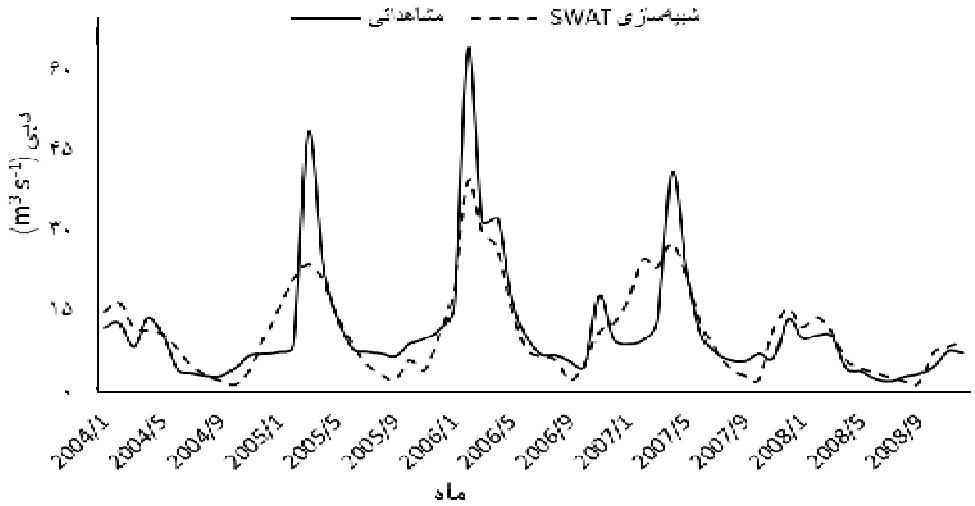
دبی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT برای دوره زمانی 2004 تا 2008 در ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد همراه با دبی اندازه‌گیری شده در شکل 3 آورده شده است که به تشخیص دقت شبیه‌سازی مدل، اختلاف در زمان و مقدار دبی پیک مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده و همچنین شکل منحنی صعودی و نزولی جریان در حوضه آبخیز کمک می‌کند. نتایج ارزیابی کارآیی مدل با استفاده از ضرایب آماری نشان داد که مدل از قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی رواناب حوضه برخوردار هست (جدول 5) که با مطالعات انجام‌شده در مناطق مختلف کشور مطابقت دارد (گلشن و همکاران 1394، کاویان و همکاران 1394). همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل IHACRES برای دوره واسنجی در شکل 4 آورده شده است. مقایسه نتایج دبی شبیه‌سازی مدل با دبی مشاهداتی نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین هیدروگراف دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی وجود دارد و مدل IHACRES به‌خوبی دبی مشاهداتی و زمان وقوع دبی اوج را شبیه‌سازی کرده است. ضرایب آماری به‌دست‌آمده در جدول 5 ارائه‌شده است که به عملکرد مدل IHACRES در حوضه‌های آبخیز استان گلستان (خیرفام و همکاران 1392) و استان مازندران (زارعی و همکاران 1390) نزدیک هست. صحت‌سنجی نتایج مدل برای افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت شبیه‌سازی مدل ضروری است (کاویان و همکاران 1394). بنابراین، بدون تغییر در مقدار پارامترهای ورودی، مدل‌های مورداستفاده توسط داده‌های رواناب مشاهده‌ای برای دوره 2009 تا 2010 صحت‌سنجی شدند. نتایج صحت‌سنجی مدل‌ها در شکل‌های 5 و 6 به‌ترتیب برای مدل SWAT و IHACERS ارائه شده است. مقدار ضرایب آماری ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی مدل‌ها در جدول 5 آورده شده است. در مرحله صحت‌سنجی دقت مدل IHACRES به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافته است، درحالی‌که دقت مدل SWAT تغییر زیادی نکرده است. افزایش دقت مدل IHACRES در مرحله صحت‌سنجی در مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق نیز قابل‌مشاهده است (خیرفام و همکاران 1392، تاسومبات و سیرونگستانون 2010) به‌طوری‌که در مطالعات خیرفام و همکاران (1392) از 7 زیرحوضه مطالعاتی در 6 زیرحوضه به‌طور متوسط ضریب همبستگی 0/24 افزایش یافته و بیشینه ضریب همبستگی به‌دست‌آمده 0/395هست.



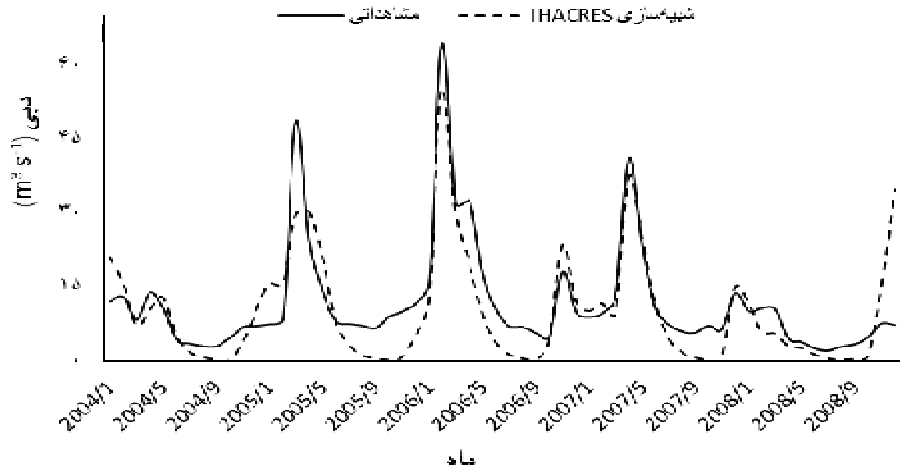
شکل 3- همبستگی بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در دوره واسنجی در ایستگاه خرم‌آباد.



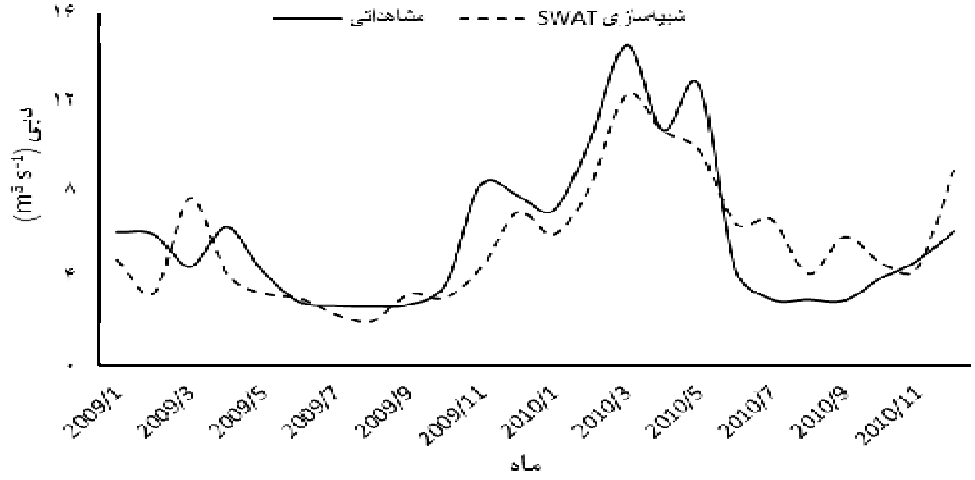
شکل 4- همبستگی بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی در دوره صحت‌سنجی در ایستگاه خرم‌آباد.



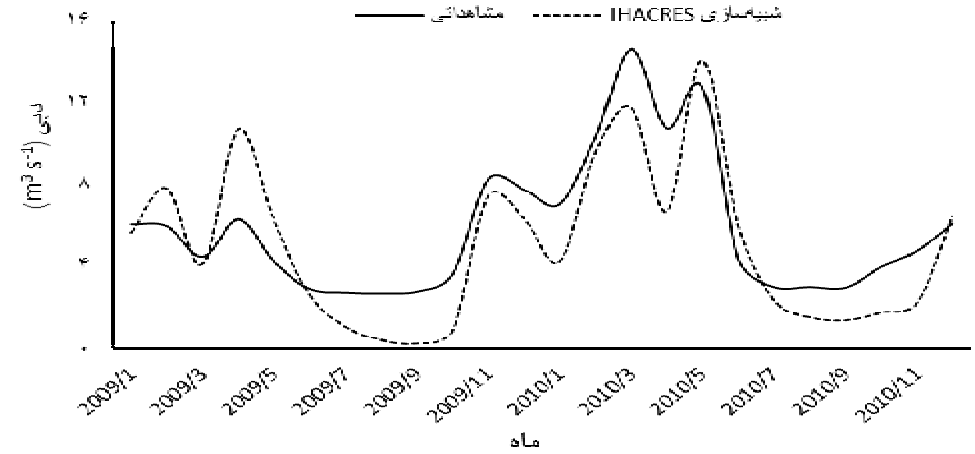
شکل 3– دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره واسنجی مدل SWAT برای حوضه آبخیز خرم‌آباد.



شکل 4– دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره واسنجی مدل IHACRES برای حوضه آبخیز خرم‌آباد.



شکل 5- دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی مدل SWAT برای حوضه آبخیز خرم‌آباد.



شکل 6- دبی شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی مدل IHACRES برای حوضه آبخیز خرم‌آباد.

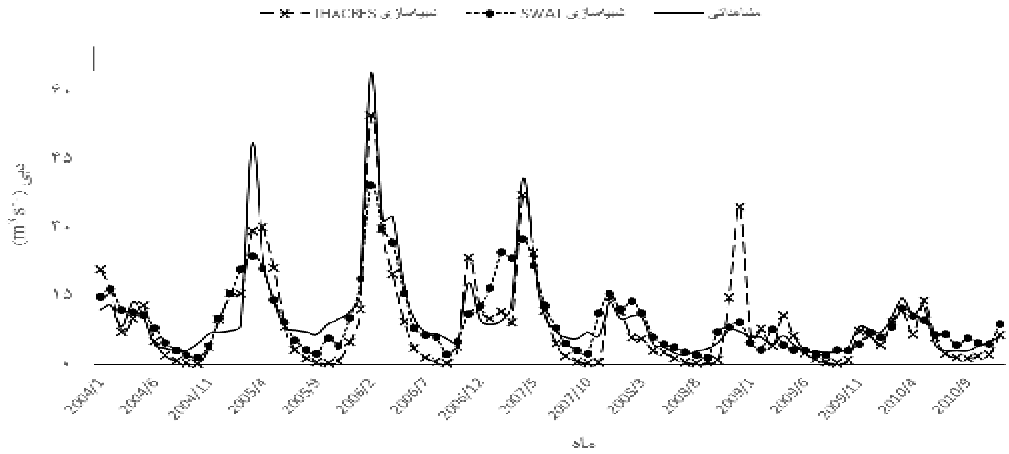
جدول 5- ضرایب آماری شبیه‌سازی مدل SWAT و IHACRES در دوره صحت‌سنجی.

مدل	طول دوره آماری	R^2	NS	bR^2	RMSE ($m^3 s^{-1}$)
SWAT	60 ماه	0/68	0/72	0/32	0/14
IHACRES	60 ماه	0/72	0/53	0/36	0/15
SWAT	24 ماه	0/66	0/63	0/44	0/17
IHACRES	24 ماه	0/73	0/68	0/44	0/13

مقایسه مدل‌ها در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

طبق مطالعات بنامن و شوماکر (2005) و سانتی و همکاران (2001)، شبیه‌سازی مدل موقعی می‌تواند رضایت‌بخش تشخیص داده شود که شاخص آماری R^2 بیشتر از 0/6 و نش-ساتکلیف بیشتر از 0/5 باشد که در مطالعات انجام‌شده توسط گلشن و همکاران (1394) و کاویان و همکاران (1394) به‌منظور معیاری برای ارزیابی کارآیی مدل هیدرولوژکی SWAT مورداستفاده قرار گرفته است. بنابراین مدل‌های هیدرولوژیک یکپارچه و نیمه‌توزیعی مورداستفاده در حوضه آبخیز خرم‌آباد از عملکرد بالایی برخوردار می‌باشند. متوسط دبی مشاهداتی در دوره واسنجی در ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد 11/625 مترمکعب بر ثانیه هست که مدل SWAT

متوسط دبی 11/423 و مدل IHACRES متوسط دبی 10/19 مترمکعب بر ثانیه را برای این دوره شبیه‌سازی کرده‌اند. در ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد در ماه مارس 2005 ، فوریه 2006 و آوریل 2007 بیشترین دبی اوج مشاهداتی بر حسب مترمکعب بر ثانیه به‌ترتیب 48/51، 64/14 و 40/96 هست. مدل SWAT مقدار دبی اوج را برای این ماه‌ها به‌ترتیب 23/95، 39/47 و 27/72 مترمکعب بر ثانیه و مدل IHACRES مقدار دبی اوج را 29/44، 54/96 و 37/30 مترمکعب بر ثانیه شبیه‌سازی کرده‌اند. مدل IHACRES مقدار دبی متوسط 7/2 در اسفندماه 2008 را به‌صورت 34/7 مترمکعب بر ثانیه شبیه‌سازی کرده است که احتمالاً به دلیل متوسط بالای بارندگی ماهانه (58 و 60 میلی‌متر) در ماه‌های بهمن و اسفند 2008 باشد. با توجه به شکل‌های 3 و 4 شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به‌صورت کم‌برآورد[10] می‌باشند به‌طوری‌که بیشتر شبیه‌سازی‌ها در پایین خط 45 درجه قرار گرفته‌اند. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل‌ها مشخص شد که مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی‌های کم و متوسط نسبت به مدل IHACRES از قابلیت بهتری برخوردار هست درحالی‌که مدل IHACRES دبی‌های اوج را نسبت به مدل SWAT بهتر شبیه‌سازی می‌کند (شکل 7). این موضوع می‌تواند به‌دقت کم مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حاصله از ذوب برف مربوط باشد که در بسیاری از مطالعات انجام‌شده با استفاده از مدل SWAT این موضوع بیان‌شده است (عثمانی و همکاران 2013، کاویان و همکاران 1394).



شکل 7- تطابق نمودار مشاهداتی با نمودار شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SWAT و IHACRES.

نتیجه‌گیری کلی

فرآیند تبدیل بارندگی به رواناب فرآیندی کاملاً غیرخطی هست و از نظر زمانی و مکانی نیز پدیده‌ای متغیر است. تشریح چگونگی تبدیل بارش به رواناب در بسیاری از مدل‌ها متفاوت است. مدل‌های زیادی جهت تشریح پیچیدگی‌های فرآیند شبیه‌سازی بارش به رواناب در پژوهش‌های گوناگون، پیشنهاد گردیده است که انتخاب مناسب‌ترین مدل برای هر کار به‌خصوصی را به‌دلیل افزایش بهره‌وری دشوار می‌کند. بنابراین ارزیابی مقایسه‌ای برای تعیین کارآیی مدل‌ها برای اهداف مختلف حائز اهمیت است. در این تحقیق از مدل یکپارچه IHACRES و مدل نیمه‌توزیعی SWAT برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شد. مدل IHACRES یک مدل با ورودی‌های کم، قابل‌دسترس و بدون پیچیدگی زیاد هست. از طرفی مدل SWAT یک مدل با پیچیدگی زیاد است که برای اجرا شدن در یک منطقه نیاز به اطلاعات زیاد از جمله نقشه خاک‌شناسی دقیق با لایه‌های خاک دارد که امکان تهیه آن برای همه حوضه‌های آبخیز

[10]- Underestimate

مشکل هست. دوره انتخابی برای شبیه‌سازی دبی جریان در هر دو مدل یکسان انتخاب شد. بررسی‌های این تحقیق نشان داد که دقت مدل نیمه‌توزیعی در شبیه‌سازی دبی جریان با دقت مدل یکپارچه تفاوت قابل‌توجهی ندارد و مدل یکپارچه با توجه به ورودی‌های هواشناسی قابلیت شبیه‌سازی مقدار دبی جریان در حوضه آبخیز را دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مناطقی که امکان تهیه اطلاعات جزئی‌تر از حوضه آبخیز فراهم هست از مدل‌های نیمه‌توزیعی مانند SWAT، HSPF و SWIMM استفاده شود. درصورتی‌که این اطلاعات در دسترس نباشد، مدل‌های یکپارچه مانند IHACRES از قابلیت خوبی برای شبیه‌سازی دبی جریان برخوردار می‌باشند و با توجه به مطالعات وسیع انجام‌شده با استفاده از این مدل در مناطق مختلف کشور می‌توان این مدل را برای شبیه‌سازی رواناب در مناطق فاقد اطلاعات مکانی معرفی کرد.

منابع مورداستفاده

ابراهیمی ح، 1390. ارزیابی کارآیی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز رودخانه دویرج در استان ایلام. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه زابل.

باستانی‌اله‌آبادی آ، تلوری ع و حسینی م، 1391. ارزیابی مدل SWAT2009 در برآورد رواناب حوضه آبخیز کردان. همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای، 3 خرداد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر کرد، شهرکرد.

خیرفام ح، مصطفی‌زاده ر و صادقی س‌ح‌ر، 1392. تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوضه‌های آبخیز استان گلستان. پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز شماره 7، صفحه‌های 114 تا 127.

زارعی م، حبیب‌نژاد م، شاهدی ک و قنبرپور م، 1390. کالیبراسیون و ارزیابی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به منظور شبیه‌سازی جریان روزانه. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 25، شماره 1، صفحه‌های 104 تا 114.

شریفی ف، صفارپور ش و ایوب‌زاده س‌ع، 1383. ارزیابی مدل رایانه‌ای AWBM2002 در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی تعدادی از حوضه‌های آبخیز ایران. پژوهش و سازندگی، شماره 63، صفحه‌های 35 تا 42.

کاویان ع، گلشن م، روحانی ح و اسمعلی‌عوری ا، 1394. شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه آبخیز هراز با استفاده از مدل SWAT. مجله پژوهش‌های جغرافیای تهران، دوره 47، شماره 2، صفحه‌های 197 تا 211.

گلشن م، کاویان ع، روحانی ح و اسمعلی‌عوری ا، 1394. واسنجی چند ایستگاهی رواناب حوضه آبخیز هراز با مدل SWAT. مجله تحقیقات آب و خاک تهران، دوره 46، شماره 2، صفحه‌های 293 تا 303.

Abbaspour KC, 2012. SWAT-CUP 2012: SWAT calibration and uncertainty programs - a user manual. Eawag: Swiss Federal Institute Science and Technology.

Abbaspour KC, Vejdani M and Haghighat S, 2007. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. Christchurch, New Zealand.

Abushandi E and Merkel B, 2013. Modeling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. Journal of Water Resource Management 27: 2391-2409.

Anonymous, 1972. National Engineering Handbook. United States Department of Agriculture Soil Conservation Service (USDA). Washington DC, US Govt. printing office.

Anonymous, 2000. Hydrologic Engineering Center (HEC). User's Manual HEC-HMS Hydrologic Modeling System. Version 2.0. US Army Corps of Engineers, USA.

Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, Abbaspour KC, White MJ, Srinivasan R, Santhi C and Jha MK, 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE 55 (4): 1491-1508.

Beven K, 2001. How far can we go in distributed hydrological modelling?. Journal hydrology. Earth Systems Science 5: 1-12.

Beven K, Lamb R, Quinn P, Romanowicz R and Freer J, 1995. TOPMODEL. Pp.627–668. In: VP, Singh, (Ed). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Colorado, USA.

Binaman J and Shoemaker CA, 2005. An analysis of high-flow sediment event data for evaluating model performance. Journal of Hydrological Processes 19: 605-620.

Boughton W, 2006. Calibrations of a daily rainfall runoff model with poor quality data. Environmental Modelling and Software 21:1114-1128.

Carcano EC, Bartolini P, Muselli M and Piroddi L, 2008. Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modelling daily stream flows. Journal of Hydrology 362: 291–307.

Carlile PW, Croke BFW, Jakeman AJ and Lees BG, 2004. Development of a semi-distributed catchment hydrology model for simulation of land-use change streamflow and groundwater recharge within the little river catchment, NSW. Pp. 54–56. In I.C. Roach (Ed). Regolith, CRC LEME.

Clausen B and Biggs BJF, 2000. Flow variables for ecological studies in temperate streams: groupings based on covariance. Journal of Hydrology 237: 184- 197.

Croke BFW, Andrews F, Jakeman AJ, Cuddy SM and Luddy A, 2005. Redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. In 29th Hydrology and Water Resources Symposium. 21–23 February, Canberra.

Croke BFW, Andrews F, Jakeman AJ, Cuddy SM and Luddy A, 2006. IHACRES Classic Plus: A redesign of the IHACRES rainfall runoff model. Environment Modelling and Software 21: 426-427.

Croke BFW, Merritt WS and Jakeman AJ, 2003. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. Journal of Hydrology 291: 115–131.

Cunderlik TM, 2003. Hydrologic model selection fort the CFCAS project: Assessment of water resources Risk and vulnerability to Changing Climatic Conditions, project Report I. University of Western Ontario, Canada.

Dye PJ and Croke BFW, 2003. Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. Environmental Modelling and Software 18: 705–712.

Ficklin DL, Stewart IT and Maurer EP, 2013. Effects of projected climate change on the hydrology in the Mono Lake Basin. Journal California Climatic Change 116 (1): 111-131.

Gassman PW, Reyes M, Green CH and Arnold JG, 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future directions. Journal Transactions of the ASABE 50 (4): 1212-1250.

Gotzinger J and Bgrdossy A, 2007. Comparison of four regionalization methods for a distributed hydrological model. Journal of Hydrology 333: 374–384.

Kirchner JW, 2012. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. Water Resources Researches 42: 1-5.

Kisi O, 2004. River flow modeling using artificial neural networks. Journal of Hydrologic Engineering ASCE 9: 60-63.

Lerat J, Andréassian V, Perrin C, Vaze J, Perraud JM, Ribstein P and Loumagne C, 2012. Do internal flow measurements improve the calibration of rainfall–runoff models?. Journal of Water Resource Research 48 (2): 1-18.

Letcher RA, Jakeman AJ, Calfas M, Linforth S, Baginska B and Lawrence I, 2002. A Comparison of catchment water quality models and direct estimation techniques. Environmental Modelling and Software 17: 77-85.

Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR and Williams J, 2005. Soil Water Assessment Tool Theoretical Document, Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, TX, USA.

Nielsen SA and Hansen E, 1973. Numerical simulation of the rainfall runoff process. Nordic Hydrology 4: 171–190.

Osmani H, Motamedvaziri B and Moeini A, 2013. Flow simulation, calibration and validation of SWAT model (case study of upstream the Latyan dam). Journal of Watershed Engineering and Management 5: 134-143.

Santhi C, Arnold JG, Williams J, Dugas WA and Hauck L, 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. The American Water Resources Association 37 (5): 1169-1188.

Sriwongsitanon N and Taesombat W, 2011. Estimation of the IHACRES model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper ping river basin. Kasetsart Journal (Natural Science) 45: 917-931.

Sugawara M, 1974. Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin Rive, Kitsu River, Sanaga River and Namrmune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention 11: 1–64.

Suppes P, 1961. A comparison of the meaning and uses of models in mathematics and the empirical sciences. Springer, Netherlands.

Taesombat W and Sriwongsitanon N, 2010. Flood investigation for the upper Ping river basin using the mathematical models. Kasetsart Journal (Natural Science) 44: 152–166.

Vaze J, Post DA, Chiew FHS, Perraud JM, Viney NR and Teng J, 2010. Climate non-stationary-validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. Journal of Hydrology 394: 447-457.

Yang J, Reicher P, Abbaspour KC, Xia J and Yang H, 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chao he Basin in China. Journal of Hydrology 358 (1–2): 1–23.

Ye W, Jakeman AJ and Young PC, 1997. Identification of improved rainfall runoff models for an ephemeral low-yielding Australian catchment. Environmental Modelling and Software 13: 59-74.

Yen H, White MJ, Jeong J and Arnold JG, 2015. Evaluation of alternative surface runoff accounting procedures using the SWAT model. International Journal of Agriculture and Biology Engineering 8 (1): 1-15.

Young PC and Garnier H, 2006. Identification and estimation of continuous time, data-based mechanistic (DBM) models for environmental systems. Environmental Modelling and Software 21: 1055-1072.

Zuo D, Xu Z, Zhao J, Abbaspour K, Yang H, 2015. Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China. Hydrological Sciences Journal. 60 (3): 505-522.