2019, Vol.5, No.2, Pages 81 to 90
Journal of Water and Sustainable Development

سال پنجم، شماره ۲، ۱۳۹۷، صفحات ۸۱ تا ۹۰
نشریه آب و توسعه پایدار

Evaluation and Comparison of Lumped and Semi-Distributed Rainfall-Runoff Models

B. Mansouri[1*], R. Pirmoradian [2]

1- MSc Graduated in Water Resources Engineering, Aboureyhan, University of Tehran, Tehran, Iran. 2- PhD candidate in Water Resources Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

*(Corresponding Author Email: bahareh.mansouri@gmail.com)

Received: 26-07-2017
Accepted: 19-03-2018

Abstract

The hydrological sector is one of the most important and fundamental natural sectors in catchments. In order to evaluate the behavior of this sector under different conditions, it is essential to model hydrological processes. One of the aims of conducting hydrological studies is to determine the relationships between rainfall and runoff. Since it is not possible to measure all quantities required for the runoff analysis in the catchments, it is necessary to select a model which has a simple structure and a reduced number of parameters that can accurately simulate the runoff caused by rainfall. In this study, classification of hydrological models and the results of several models used in different case studies have initially been investigated. Furthermore, some of the information associated with several rainfall-runoff models have been noted. In the next step the model evaluation criteria and comparison of the selected models according to these criteria for the final model selection has been offered. Finally, the choice of the best model has been provided. According to the capabilities and limitations of each model, by considering the necessities and objectives of the considered rainfall-runoff model in each catchment, the appreciate model can be selected. Although it is better to select the lumped models because of their simplicity of structure and minimal required data and ease of use, it is better to select the semi-distributed models. Since semi-distributed models are in a position between the high simplicity of lumped models and the extensive required data by distributed models.

Keywords: Best model selection, Rainfall-Runoff, Hydrological models, Model comparison, Evaluation criteria.

ارزیابی و مقایسه مدل‌های توده‌ای و نیمه‌توزیعی بارش-رواناب

بهاره منصوری[۱*]، رقیه پیرمرادیان[۲]

۱- فارغ التحصیل کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران.
۲- دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، دانشگاه شهرکرد.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: bahareh.mansouri@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۰۴
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۲۸

چکیده

فرآیندهای هیدرولوژیکی یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین فرآیندهای طبیعی هر حوضه آبریز است. باتوجه‌به پیچیدگی حوضه آبریز و برای دست یافتن به اهداف مورد نظر اقدام به مدل‌سازی می‌شود. یکی از اهداف انجام مطالعات هیدرولوژیکی اغلب ایجاد روابط بارش-رواناب است. چون در حوضه‌های آبریز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز، جهت تحلیل رواناب وجود ندارد، انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل عوامل، رواناب حاصل از بارندگی را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند، امری ضروری است. در این تحقیق، ابتدا انواع طبقه‌بندی مدل‌های هیدرولوژیکی و نتایج حاصل از برخی مدل‌های به‌کارگرفته شده در نقاط مختلف جهان مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه بخشی از اطلاعات در ارتباط با چند مدل بارش-رواناب ذکر شده و در گام بعد معیارهایی برای ارزیابی مدل‌ها و مقایسه مدل‌های منتخب بر اساس این معیارها ارائه و در نهایت امکان انتخاب مناسب‌ترین مدل فراهم شده است. باتوجه‌به قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر مدل و باتوجه‌به نیازها و اهداف مورد انتظار از مدل‌سازی بارش-رواناب در هر حوضه، در نهایت باید مدلی انتخاب شود که در راستای اهداف مسئله باشد. هر چند انتخاب مدل‌های توده‌ای به جهت سادگی ساختار و حداقل داده‌های مورد نیاز و نیز کاربری آسان آن‌ها به نوعی در اولویت قرار می‌گیرد اما در یک انتخاب مناسب‌تر، مدل‌های نیمه توزیعی باید مورد توجه قرار گیرند، به‌دلیل اینکه در موقعیتی بین سادگی بیش از حد مدل‌های توده‌ای و داده‌های گسترده مورد نیاز برای مدل‌های توزیعی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: انتخاب مناسب‌ترین مدل، بارش-رواناب، مدل‌های هیدرولوژیکی، مقایسه مدل‌ها، معیارهای ارزیابی.

DOI: 10.22067/jwsd.v5i2.66081

مقدمه

کشور ایران با موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خاص خود، سهم اندکی از ریزش‌های جوی را به‌عنوان منبع اصلی آب دریافت می‌کند. به‌طوری‌که با دارا بودن میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلیمتر یعنی یك سوم مقدار جهانی (۸۶۰ میلیمتر)، جزء اقلیم‌های خشك و نیمه‌خشك محسوب می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۷). بنابراین نیاز به برنامه‌ریزی‌های محیطی در زمینه منابع آب اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد. رواناب ناشی از بارندگی و ذوب برف یکی از منابع عمده آبی است که جهت رفع کمبود مصارف کشاورزی، صنعتی و آشامیدنی حائز اهمیت است. درصد زیادی از حجم بارندگی در مناطق مختلف کشور تحت تأثیر عواملی همچون، تشکیلات و ساختار زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، شیب زمین و شکل حوضه آبریز به رواناب سطحی تبدیل می‌شود. لذا برآورد رواناب حاصل از بارندگی و به‌کارگیری روش‌های جمع‌آوری و مهار آب‌های سطحی از نظر تأمین آب روز به روز اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در بسیاری از حوضه‌های آبریز که نیازمند برنامه‌ریزی منابع آب هستند، ایستگاه‌های هیدرومتری برای اندازه‌گیری وجود ندارد، یا اینکه آمار ایستگاه‌های اندازه‌گیری ناقص است. باتوجه‌به پیچیدگی حوضه آبریز و برای دست یافتن به اهداف مورد نظر اقدام به مدل‌سازی می‌شود. مدل‌های هیدرولوژی تصویر ساده شده‌ای از یک سیستم هیدرولوژیکی واقعی بوده و برای مدل‌سازی فرآیندهای جریان سطحی و یا آب‌های زیرزمینی طراحی شده‌اند و شامل ابزارهایی برای کنترل و مدیریت منابع آب می‌باشند (Reed و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از اهداف انجام مطالعات هیدرولوژی ایجاد روابط بارش-رواناب است (Shah و همکاران، ۱۹۹۶).در این راستا مدل‌های بارش رواناب به‌صورت گسترده برای مطالعات منطقه‌ای به‌منظور پیش‌بینی سری زمانی رواناب روزانه در حوضه‌های فاقد آمار استفاده می‌شود (Li و Zhang، ۲۰۱۷). زیرا در حوضه‌های آبریز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز، جهت تحلیل رواناب وجود ندارد، انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار و با استفاده از حداقل عوامل، رواناب حاصل از بارندگی را به‌طور دقیق پیش‌بینی کند، امری ضروری می‌باشد (شریفی و همکاران، ۱۳۸۳). مطالعات بیشتر، در رابطه با مقایسه مدل‌های هیدرولوژی می‌تواند راهبردی را برای کمک به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب فراهم آورد.در این تحقیق ابتدا به ذکر نتایج حاصل از برخی مدل‌های بارش- رواناب به‌کار گرفته شده در نقاط مختلف جهان پرداخته شده است و سپس به‌ترتیب؛ انواع طبقه‌بندی مدل‌های هیدرولوژیکی براساس تفاوت در ساختار مدل‌ها، ذکر بخشی از اطلاعات در ارتباط با برخی مدل‌های بارش-رواناب، ارائه معیارهای ارزیابی مدل‌ها و در انتها، مقایسه مدل‌های منتخب براساس این معیارها ارائه شده است.

سوابقی از مدل‌های بارش-رواناب به‌کار رفته در نقاط مختلف جهان

Sharifi و Boyd (۱۹۹۴)، مدل‌های بارش-رواناب AWBM و SFB را در استرالیا مورد مقایسه قرار داده و نتیجه گرفتند که مدل AWBM بهتر از SFB رواناب را شبیه‌سازی می‌کند. Arnhjerg و Harremoes (۱۹۹۵)، یک مدل ۱۷ پارامتره پیشرفته رواناب را با یک مدل ساده رگرسیون خطی یک پارامتره بارش-رواناب مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که اگر داده‌های مناسب برای مدل‌های پیچیده در اختیار نباشد، یک مدل ساده‌تر ترجیح داده می‌شود. مدل SIMHYD در بیش از ۳۰۰ حوضه در استرالیا به‌کاربرده شده است. این مدل سه منبع ذخیره را با استفاده از هفت پارامتر به‌کار می‌برد که شامل ذخیره سطحی، ذخیره رطوبت خاک و ذخیره آب زیرزمینی هستند. برآورد حساسیت این مدل توسط Jones و همکاران، ۲۰۰۶)، با مقایسه سه مدل AWBM، SIMHYD و Zhang01 در ۲۲ حوضه استرالیا انجام شد. همچنین Haydon و Deletic (۲۰۰۷) آنالیز حساسیت پارامترهای مدل را در سه حوضه از استرالیای جنوبی بررسی کردند. Carla Carcano و همکاران (۲۰۰۸)، طی تحقیقی جهت مدل‌سازی جریان روزانه در مناطق شمالی ایتالیا، دو مدل IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج آن‌ها نشان داد درصورتی‌که داده‌های ورودی مناسب در دسترس باشد، عملکرد مدل ساده‌ای چون IHACRES نسبت به یک مدل پیچیده بهتر است. Chang و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای دو مدل ANFIS با دو نوع ورودی مختلف و نیز HEC-HMS را در برآورد خروجی‌های دو مدل مقایسه کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که کارایی مدل HEC-HMS اگر تعداد ایستگاه‌های بارش کاهش یابد افت خواهد کرد. آن‌ها دریافتند در حالتی که تمام ایستگاه‌های بارش فعال نباشند و یا به درستی کار نکند، عملکرد ANFIS مورد اعتمادتر از مدل HEC-HMS می‌باشد. Dakhlaoui و همکاران (۲۰۱۷) سه مدل GR4J، HBV و IHACRES را در ۵ حوضه در تونس تحت متغیرهای اقلیمی بلندمدت در یک دوره ۳۰ ساله به‌کار بردند. کالیبراسیون‌ها براساس معیار Kling-Gupta Efficiency انجام شد که تحت سناریوهای اقلیمی مدل‌ها رفتار مشابهی را نشان دادند، همچنین الگوی پیش‌بینی شده رواناب‌ها هنگامی‌که تحت شرایط خنک‌تر و مرطوب‌تر شبیه‌سازی شدند نسبت به شرایط خشک‌تر و گرم‌تر به الگوی واقعی رواناب نزدیک‌تر بودند. آورند و همکاران (۱۳۸۶)، نتایج برآورد سیلاب را با دو مدل HEC-HMS و WMS در حوضه آبریز مارون مقایسه کردند. ارزیابی‌های انجام شده نشان داد که نتایج محاسبات دو مدل خیلی نزدیک به هم هستند. Van Liew و همکاران (۲۰۰۳) توانایی مدل SWAT در تخمین شدت جریان تحت شرایط آب و

هوایی مختلف در سه زیر حوضه از ایالت اوکلاهومای آمریکا را بررسی کردند و دریافتند که مدل SWAT می‌تواند به‌خوبی مقدار رواناب روزانه در هر زیرحوضه را تحت شرایط خشك، معتدل و مرطوب پیش‌بینی کند. Borah و Bera (۲۰۰۳) و Borah و Bera (۲۰۰۴) پس از مقایسه مدل SWAT با چندین مدل دیگر (که در مقیاس حوضه‌ای کاربرد دارند) نتیجه گرفتند که این مدل نتایج امیدوارکننده‌ای در شبیه‌سازی پیوسته حوضه‌های تحت پوشش اراضی کشاورزی به‌دست می‌دهد. Golmohammadi و همکاران (۲۰۱۷) توانایی مدل SWAT در پیش‌بینی تغییرات موقت جریان را با به‌کارگیری آن در حوضه Gully Creek کانادا برای فواصل زمانی روزانه و ساعتی و برای پیش‌بینی جریان در ۱۶ ایستگاه بررسی کردند. نتایج ارزیابی این مدل در این حوضه نشان داد که مدل SWAT می‌تواند برای جریان‌های روزانه و ماهانه به‌خوبی کالیبره و صحت سنجی شود. گودرزی و همکاران (۱۳۹۵) کارایی مدل SWAT را به‌عنوان شبیه‌ساز جریان در سطح مقیاس حوضه آبریز قره سو آزمودند. در این مطالعه با استفاده از بهینه‌ساز SWAT-CUP پارامترها بهینه‌سازی شدند. نتایج مدل با بررسی ضریب تعیین R^2 و ضریب Nash–Sutcliffe، موفقیت مدل با استفاده از پارامترهای بهینه شده در شبیه‌سازی جریان ماهانه حوضه قره‌سو را نشان می‌دهد. آبابایی و سهرابی (۱۳۸۸)، عملکرد مدل SWAT را در حوضه آبریز زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج کلی واسنجی نشان داد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با جریان شبیه‌سازی شده رودخانه باشد. سعیدی (۱۳۹۰) شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌ای آبریز بیابانی را با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور فرآیند بارش-رواناب حوضه آبریز بالادست سد پیشین واقع در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شده است. مقایسه عملکرد مدل با شبیه‌سازی انجام گرفته توسط مدل AFFDEF، نشان از دقت خوب مدل SWAT در مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه‌های بیابانی دارد. گودرزی و همکاران (۱۳۹۱) عملکرد سه مدل هیدرولوژیکی IHACRES، SWAT، و SIMHYD را در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو مورد مقایسه قرار دادند. دوره‌های مشترک شبیه‌سازی این سه مدل از یک بازه ۳۰ ساله انتخاب شدند. شبیه‌سازی‌ها نشان داد SWAT با ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۸ و SIMHYD با ۰/۶۸ بیشترین و کمترین کارایی را در دوره واسنجی دارند. این مقادیر برای دوره صحت‌سنجی ۰/۷۳ و ۰/۴ می‌باشند. نتایج نشان داد مدل SWAT بهترین عملکرد را از شبیه‌سازی رواناب حوضه نسبت به داده‌های مشاهداتی در دوره صحت‌یابی دارد. Bouabid و Chafai Elalaoui (۲۰۱۰) اثرات تغییر اقلیم را بر منابع آب مراکش مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از دو مدل IHACRES و HEC-HMS انجام شد که نتایج نشان داد مدل‌های مذکور می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی برای پیش‌بینی جریان در پاسخ به تنوع اقلیمی برای مدیریت بهتر منابع آب مورد استفاده واقع شود.

انواع طبقه‌بندی مدل‌های هیدرولوژیکی (بارش-رواناب)

انواع مختلفی از مدل‌های هیدرولوژیکی برای نشان دادن فرآیندهای هیدرولوژی در طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های زمانی و شرایط اقلیمی وجود دارند. انواع مدل‌های هیدرولوژی را براساس تفاوت در ساختار مدل‌ها می‌توان در چهار گروه کلی طبقه‌بندی نمود (Loucks و همکاران، ۲۰۰۵):

۱- براساس تفاوت در ماهیت پارامترهای ورودی و نتایج خروجی: (مدل‌های قطعی، مدل‌های احتمالاتی)

۲- براساس تفاوت در ماهیت زمانی نتایج ورودی و خروجی مدل‌های بارش-رواناب: (مدل‌های تک واقعه، مدل‌های پیوسته)

۳- براساس تفاوت در ساختار شبیه‌سازی حوضه آبریز: (مدل‌های یکپارچه، مدل‌های نیمه‌توزیعی، مدل‌های توزیعی)

۴- براساس تفاوت در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب: (مدل‌های بر مبنای فیزیکی، مدل‌های تجربی، مدل‌های مفهومی)

متداول‌ترین رویکردهای منطقه‌ای مورد استفاده در مدل‌های بارش- رواناب (Li و Zhang، ۲۰۱۷)

۱- رویکرد مجاورت مکانی: که در آن مجموعه کامل پارامترهای حوضه فاقد آمار از حوضه‌ای که نزدیک‌ترین قرابت را از لحاظ فیزیکی با حوضه مورد مطالعه دارد شبیه‌سازی می‌شود.

۲- رویکرد شباهت فیزیکی: که در آن مجموعه کامل پارامترها از حوضه‌ای که شبیه ترین ویژگی‌های آب و هوایی و فیزیکی را به حوضه مورد مطالعه دارد به‌دست می‌آید.

۳- روش رگرسیون: که در آن یک رابطه رگرسیون بین پارامترهای حوضه‌های آبریز ایجاد می‌شود و بر اساس آن سایر پارامترهای حوضه فاقد آمار تخمین زده می‌شود.

۴- رویکرد واسنجی منطقه‌ای: که در آن مدل‌ها هم‌زمان در حوضه‌های مختلف و در یک سطح وسیع کالیبره می‌شوند تا برای به‌دست آوردن پارامترهای بیشتری تعمیم داده شوند.

۵- رویکرد شباهت هیدرولوژیکی: که در آن پارامترها از حوضه‌ای که شباهت هیدرولوژیکی بیشتری با حوضه فاقد آمار دارد (همچون شباهت در ضریب رواناب و شاخص جریان پایه) به‌دست می‌آید.

۶- روش‌های شباهت یکپارچه (IS): که در آن روش‌هایی چون مجاورت مکانی و شباهت فیزیکی ادغام می‌شود تا اثر بخشی این روش‌ها را افزایش دهند.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

مدل‌ها از نظر پیچیدگی، شمار داده‌های مشاهداتی مورد نیاز به‌عنوان پارامتر ورودی و عملکرد برای انواع مختلف حوضه‌ها متفاوت هستند. باتوجه‌به تنوع مدل‌های بارش-رواناب در دسترس، معیارهای متعددی وجود دارد که می‌تواند برای انتخاب مدل هیدرولوژیکی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. این معیارها همواره به پروژه مورد نظر بستگی داشته و هر پروژه هم شرایط و نیازهای خاص خود را دارد. خروجی‌های مورد انتظار، فرآیندهای هیدرولوژیکی (برای برآورد خروجی مورد نظر مدل می‌شود)، دسترسی به داده‌های ورودی و هزینه، برخی از این معیارها هستند.

مدل‌های بارش-رواناب منتخب

مدل‌های ریاضی متعددی برای برآورد رواناب ناشی از بارندگی در سطح حوضه گسترش داده شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های HEC-1، IHACRES، WinTR-55، AWBM، HEC-HMS، WMS، MIKE 11، SWAT و ... اشاره نمود. به‌دلیل پیچیدگی مدل‌های توزیعی و شمار داده‌های مورد نیاز، در این تحقیق برخی مدل‌های توده‌ای و نیمه‌توزیعی معرفی و مورد ارزیابی واقع شده است (جدول ۱).

جدول۱- مدل‌های بارش-رواناب منتخب جهت مقایسه

مدل‌های توده‌ای	مدل‌های نیمه توزیعی
IHACRES	HBV
AWBM	HEC-HMS
SIMHYD	SWAT
SRM	

مدل‌های توده‌ای

این مدل‌ها کل حوضه را بدون احتساب تغییرات مکانی به‌عنوان یک واحد یکپارچه در نظر می‌گیرند. همچنین شامل درجه خاصی از تجربه‌گرایی با ارائه ویژگی‌های فیزیکی به‌صورت محدود می‌باشد (Beven، ۲۰۰۰). مزیت استفاده از این مدل‌ها، ساختار ساده، حداقل داده‌های مورد نیاز، سرعت راه‌اندازی و کالیبراسیون و کاربری آسان می‌باشد. بخش‌های زیر به توصیف این مدل‌ها با جزئیات بیشتر می‌پردازد.

• مدل IHACRES

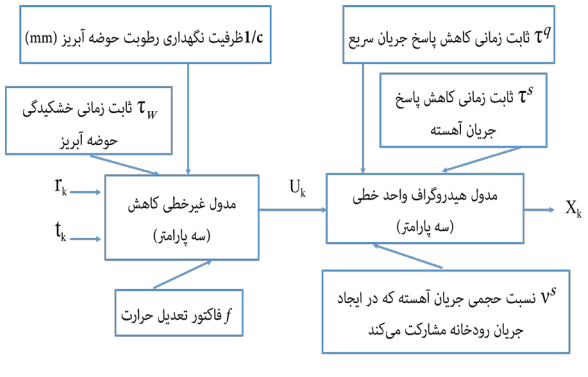
یک مدل توده‌ای و مفهومی می‌باشد که Jakeman و Hornberge (۱۹۹۳) جهت شناسایی رفتار بارش-رواناب در مقیاس حوضه آبریز ارائه کردند. این مدل امکان شبیه‌سازی جریان را به‌صورت پیوسته و یا رخدادی برای حوضه در اندازه‌های مختلف با استفاده از هر گام زمانی مساوی یا بیشتر از یک دقیقه فراهم می‌کند. این مدل، نیازمند سه مجموعه از اطلاعات (داده‌های مشاهده‌ای بارندگی (میلیمتر یا اینچ)، درجه حرارت (درجه سلسیوس، فارنهایت و یا کلوین)، دبی جریان رودخانه (مترمکعب بر ثانیه، میلیمتر در هر گام زمانی، لیتر بر ثانیه یا فوت مکعب بر ثانیه)) به‌عنوان ورودی است (User Manual، ۲۰۰۴). اطلاعات توصیفی جغرافیایی حوضه (توپوگرافی، پوشش گیاهی، خاک) مورد نیاز نمی‌باشد. به‌دلیل نیاز به داده‌های اندک در حوضه‌های آبریز فاقد آمار و یا حوضه‌هایی که از لحاظ آماری با مشکل مواجه هستند و همچنین برای مناطق خشک، جایی که مجموعه داده‌های هیدرولوژیکی بسیار کم است قابل کاربرد می‌باشد.

خروجی‌های مدل عبارتند از: مدل‌سازی جریان و سری‌های زمانی شاخص رطوبت حوضه، هیدروگراف واحد، جداسازی جریان و ارائه عدم قطعیت‌های مرتبط با پارامترهای هیدروگراف واحد.

- ساختار مدل IHACRES

اساس این روش از دو مدول غیر خطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود. به این منظور در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی k، توسط مدول غیر خطی، به بارندگی موثر (u_k) تبدیل شده و سپس به‌وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود.

مزیت این مدل این است که به تنها تعداد کمی از پارامترها، به‌طور معمول شش پارامتر (سه پارامتر برای مدول غیرخطی کاهش و سه پارامتر برای مدول هیدروگراف واحد خطی) نیاز دارد.



شکل۱- چگونگی شبیه‌سازی مدل بارش-رواناب IHACRES همراه با مدول‌های خطی و غیرخطی در روش ارائه شده توسط جکمن و هورنبرگر

• **مدل AWBM**

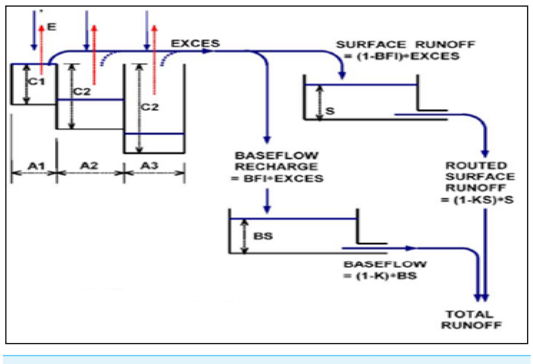
در سال ۱۹۹۰ توسعه و در سال ۱۹۹۳ تکامل یافت (Boughton، ۱۹۹۳). یک مدل کامپیوتری توده‌ای بیلان آبی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب است. براساس این مدل درصد مساحت حوضه متناسب با ظرفیت ذخیره حوضه و پتانسیل تولید رواناب تعیین می‌شود و رواناب حاصل از هر کدام از این درصدهای مساحت حوضه را ارزیابی می‌کند (Boughton ، ۲۰۰۴) (شکل ۲). یک مدل سطوح جزئی جریان سطحی اشباع است. در کل دو نظریه سازوکار تولید رواناب وجود دارد:

• نظریه هورتون (Horton، ۱۹۹۳): براساس این نظریه رواناب زمانی پدید می‌آید که شدت بارش از شدت نفوذ بیشتر باشد.

• نظریه جریان سطحی اشباع (Hewett و Hibbert،۱۹۶۷): براساس این نظریه وقتی خاک از آب اشباع شود، رواناب پدید می‌آید.

داده‌های مورد نیاز بارش روزانه، رواناب روزانه و تبخیر ماهانه می‌باشد. از مزیت‌های این مدل، سهولت دسترسی به داده‌های مورد نیاز، تعداد کم پارامترهای مورد نیاز (سه پارامتره بوده و در رودخانه‌های فصلی که آب پایه ندارد، یک پارامتره می‌شود)، ساختار نسبتاً ساده، امکان برآورد رواناب در آبخیزهای فاقد جریان پایه (امکان استفاده در مناطق خشک و نیمه‌خشک)، محاسبه رواناب در زمان‌های مختلف از مکان‌های مختلف و امکان نمایش گرافیکی خروجی‌ها است.

این مدل، رواناب روزانه و ساعتی را از بارش روزانه و ساعتی و تبخیر متوسط ماهانه محاسبه می‌کند. کاربرد نتایج روزانه در مطالعات مدیریت و استحصال آب و نتایج ساعتی در محاسبات طراحی است.

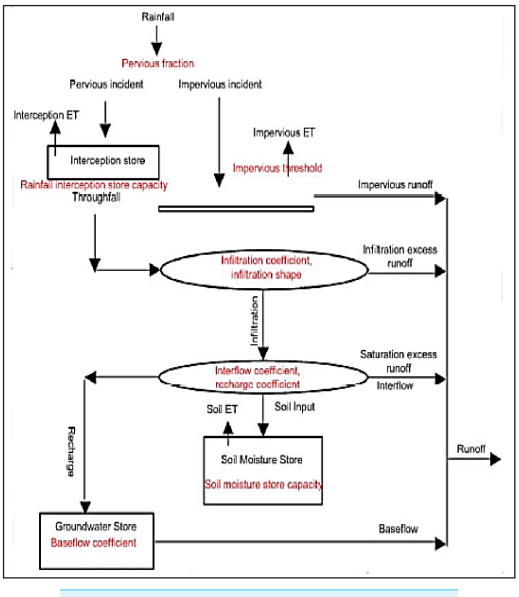


پارامتر	تعریف
(C1,C2,C3)	ظرفیت‌های ذخیره سطحی
(A1,A2,A3)	سطوح متناظر با ظرفیت ذخیره سطحی
BFI	شاخص جریان پایه
K(KS,K)	ثابت خشکیدگی روزانه جریان

شکل ۲- ساختار و پارامترهای مدل AWBM
(Argent و همکاران، ۲۰۰۵)

• **مدل SIMHYD**

نسخه ساده شده مدل مفهومی بارش-رواناب HYDROLOG در سال ۱۹۷۲ و MODHYDROLOG در سال ۱۹۹۱ تولید شده است (Chiew و همکاران، ۲۰۰۲). یک مدل مفهومی و توده‌ای بیلان آب جرمی است. بر اساس تئوری جریان اشباع، جریان روزانه را با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر تعرق پتانسیل روزانه شبیه‌سازی می‌کند (Argent و همکاران، ۲۰۰۵). از ویژگی‌های منحصر به فرد SIMHYD تقسیم حوضه آبریز به سطوح نفوذپذیر و غیر قابل نفوذ می‌باشد. در مدل SIMHYD از هفت پارامتر استفاده می‌شود که شامل: ضریب جریان پایه، ضریب نفوذ، ضریب رواناب سطحی، کسر نفوذ، ظرفیت ذخیره قطع بارش، ضریب تغذیه و ظرفیت ذخیره رطوبت خاک می‌باشند (شکل ۳). شکل زیر ساختار و پارامترهای این مدل بارش-رواناب را نشان می‌دهد.



پارامتر	تعریف
K	ضریب جریان پایه
ImpT	آستانه نفوذناپذیری
COEFF	ضریب نفوذ
SQ	شکل نفوذ
SUB	ضریب جریان ورودی
Perv	کسر نفوذ پذیری
INSC	ظرفیت ذخیره برگاب
CRAK	ضریب رواناب سطحی
SMSC	ظرفیت ذخیره رطوبت خاک

شکل۳- ساختار و پارامترهای مدل SIMHYD
(Argent و همکاران، ۲۰۰۵)

• مدل SRM

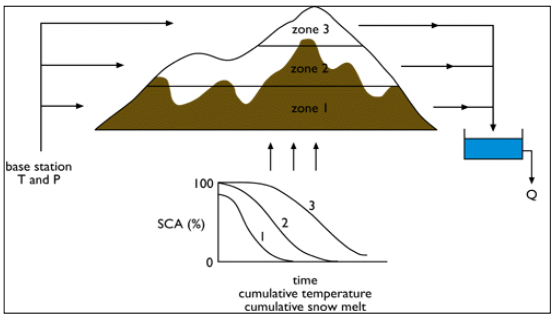
نسخه اصلی این مدل را Martinez (۱۹۷۵) در مؤسسه تحقیقات برف و بهمن سوئیس (SSARI)، برای شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه‌های کوچک کوهستانی در اروپا توسعه داد و در سال ۱۹۸۶ مورد تأیید سازمان جهانی هواشناسی قرار گرفت. نسخه چهارم در سال ۱۹۹۴ (قابل استفاده برای حوضه‌های کوهستانی وسیع) ارائه شد. اولین نسخه تحت سیستم عامل ویندوز در سال ۲۰۰۲ ارائه شد. نسخه ۲۰۰۵ امکان تقسیم حوضه تا ۱۶ ناحیه ارتفاعی را فراهم می‌کند (شکل ۴). مدل برای حوضه‌های با محدوده مساحت ۱۲۰۰۰۰-۰/۷۶ کیلومتر مربع و محدوده ارتفاعی ۷۶۹۰-۳۰۵ متر اعمال شده است، که رواناب ناشی از باران و ذوب برف را به‌صورت روزانه محاسبه می‌کند.

داده‌های مورد نیاز مدل عبارتند از:

- ویژگی حوضه: مساحت حوضه یا ناحیه‌های ارتفاعی و منحنی سطح-ارتفاع

- متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی: دما، بارندگی، سطح پوشش برف، دبی

پارامترهای مدل، ضریب رواناب برف و باران، ضریب درجه-روز، درجه حرارت بحرانی، نرخ کاهش درجه حرارت با ارتفاع، زمان تأخیر، ضریب فروکش جریان، سطح مؤثر بارش می‌باشد.



شکل۴- ساختار مدل SRM

مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی

در این گونه مدل‌ها، پارامترها تا حدی نسبت به مکان متغیر بوده و مدل امکان تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها را فراهم می‌نماید (Beven، ۲۰۰۰). مدل‌های نیمه توزیعی از نظر تعداد داده‌های ورودی و پیچیدگی دارای موقعیتی بین مدل‌های توده‌ای و مدل‌های کاملاً توزیعی می‌باشند. مزیت اصلی مدل‌های نیمه توزیعی نسبت به مدل‌های توده‌ای، ساختار آن‌ها است که مبنای فیزیکی دارد و نسبت به مدل‌های کاملاً توزیعی نیاز به داده‌های کمتری دارند.

• مدل HEC-HMS

مهندسان هیدرولوژی مرکز مهندسی ارتش آمریکا (US-ACE)، این مدل را برای شبیه‌سازی رخدادی و پیوسته فرآیند بارندگی-رواناب، در دوره‌های زمانی طولانی مدت طراحی کرده‌اند. نسخه توسعه‌یافته HEC-1، تحت ویندوز و یک مدل نیمه‌توزیعی با مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است. زبان برنامه‌نویسی که HEC-HMS در آن تعریف شده، ترکیبی از محیط‌های برنامه‌نویسی C، C^{++} و فرترن می‌باشد (HEC-HMS، User's Manual Version 3.5، ۲۰۱۰).

مؤلفه‌های مدل برای شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیک در حوضه عبارتند از:

- مؤلفه مدل حوضه (Basin Model Component): نشان‌دهنده نمایش فیزیکی حوضه است.

- مؤلفه مدل اقلیمی (Meteorologic Model Component): تحلیل داده‌های هواشناسی که شامل، داده‌های بارش (نوع بارش، مقدار و توزیع مکانی و زمانی آن)، تبخیر و تعرق می‌باشد.

- نمایه‌های کنترلی (Control Specification Component): شامل اطلاعاتی چون، زمان شروع، زمان پایان، گام زمانی اجرای شبیه‌سازی است.

- مؤلفه داده‌های ورودی (Input Data Component): سری زمانی داده‌ها و داده‌های شبکه‌ای اغلب به‌عنوان پارامتر یا شرایط مرزی در حوضه و مدل‌های هواشناسی مورد نیاز است.

این داده‌ها به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت انجام محاسبات در دامنه وسیعی از نواحی با ژئوگرافی متفاوت را دارد و دارای دو بخش عمده مدول تبدیل بارش به رواناب و مدول روندیابی سیلاب در آبراهه برای شبیه‌سازی سیلاب است که روش‌های مختلفی را برای تبدیل بارش به رواناب ارائه می‌دهد (www.hec.usace.army.mil). همچنین مدل دارای قابلیت کالیبراسیون خودکار، قابلیت بهینه‌سازی پارامترها، ذخیره‌سازی و مدیریت داده‌ها و امکانات گرافیکی و گزارش‌دهی است (HEC-HMS Technical Manual، ۲۰۰۰).

• مدل SWAT

یک مدل هیدرولوژیکی، پیوسته زمانی، نیمه‌توزیعی، مفهومی و با پایه فیزیکی است که توسط USDA-ARS توسعه یافته و پشتیبانی می‌شود. ابزاری جامع و بین رشته‌ای، بسیار انعطاف‌پذیر و قوی برای شبیه‌سازی مسائل مختلف مربوط به حوضه آبریز است.

مؤلفه‌های مدل SWAT، مؤلفه‌های اقلیمی، هیدرولوژی، درجه حرارت، خصوصیات خاک و مدیریت زمین است (Gassman و همکاران، ۲۰۰۷). فرآیندهای هیدرولوژیکی اصلی که توسط مدل شبیه‌سازی می‌شود عبارتند از: تبخیر و تعرق، رواناب سطحی،

ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی، جریان آب‌های زیرزمینی و زیرسطحی. جدول (۲) حاوی ورودی‌های مدل SWAT است.

جدول ۲- ورودی‌های مدل SWAT

فیزیکی	اقلیمی	هیدرولوژی
-ارتفاع -پوشش زمین (CN، ضریب مانینگ، نقشه پوشش زمین) خاک (رواناب، نفوذ، رسوب، تبادل آنیون)	-بارش -دمای هوا (حداقل و حداکثر) -تابش خورشیدی -سرعت باد -رطوبت نسبی	-رواناب و رسوب -اطلاعات موقعیت هر ایستگاه -اطلاعات تحویل مواد مغذی -تبخیرتعرق

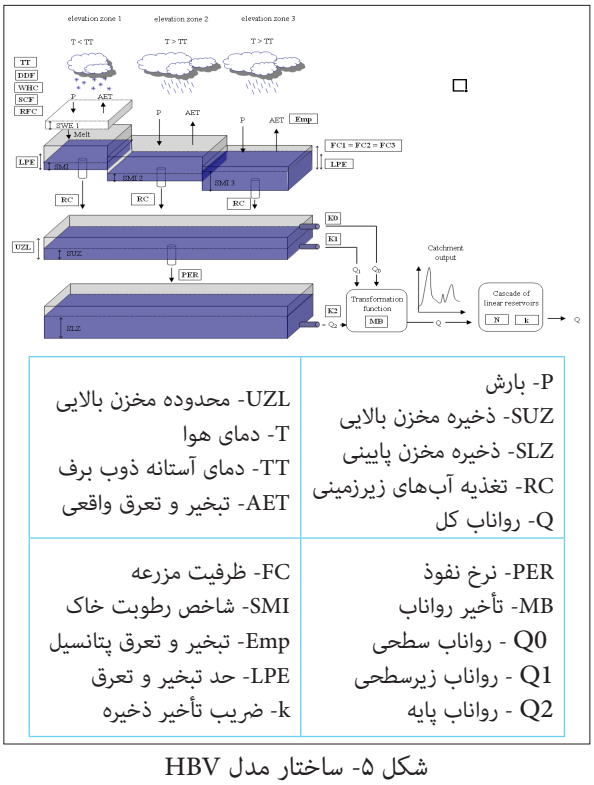
مدل SWAT یک ابزار کارآمد برای ارزیابی منابع آب برای طیف وسیعی از مقیاس‌ها و شرایط زیست محیطی در سراسر جهان است (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸؛ Arnold و Fohrer ، ۲۰۰۵). فرآیندهای مربوط به هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحت شیوه‌های مختلف مدیریتی در حوضه‌های با شرایط پیچیده هیدرولوژیکی شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توانایی محاسبه میزان تبخیر و تعرق به سه روش، پنمن-مونتیث، پریستلی-تیلور و هارگریوز را دارد و امکان شبیه‌سازی فرآیندهای مربوط به رشد گیاه که بر میزان تبخیر و تعرق و رطوبت خاک تأثیرگذار است را فراهم می‌کند. در حوضه‌های فاقد آمار قابل استفاده بوده و قابلیت لینک شدن با GIS را دارد و یک رابط گرافیکی کاربر پسند را فراهم می‌کند. اثرات تغییر اقلیم را می‌توان به‌طور مستقیم در SWAT با اختصاص، اثرات افزایش غلظت CO2 جو بر روی رشد و تعرق گیاه، تغییر در ورودی‌های اقلیمی شبیه‌سازی کرد. این مدل به‌علت پیچیدگی و لحاظ کردن اکثر عوامل موثر در فرآیند بارش-رواناب دارای پارامترهای متعددی است (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۵).

• مدل HBV

یک مدل هیدرولوژیکی همه منظوره، مفهومی، نیمه‌توزیعی و یک ابزار پیش‌بینی استاندارد است که در مؤسسه هیدرولوژیکی و هواشناسی سوئد (SHMI) توسعه یافته است. مدل نیازمند داده‌های بارش، دمای هوا و برف در صورت وجود، برآوردهای ماهانه تبخیر و تعرق، رواناب برای کالیبراسیون و اطلاعات جغرافیایی حوضه می‌باشد (http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html). مدل دبی ساعتی، شاخص رطوبت خاک، آب معادل برف را با دریافت ورودی‌ها تولید می‌کند. از جمله قابلیت‌های مدل، شبیه‌سازی رواناب رودخانه برای حوضه در اندازه‌های مختلف، تفکیک حوضه به زیر حوضه‌ها، مناطق ارتفاعی و انواع پوشش زمین است. مدل HBV برای یک گام زمانی روزانه (گام‌های زمانی کوتاه‌تر به‌صورت یک گزینه در دسترس می‌باشد) طراحی شده است.

(www.smhi.se/sgn0106/if/hydrologi/hbv.htm)

ساختار مدل HBV در شکل (۵) ارائه شده است.



P- بارش SUZ- ذخیره مخزن بالایی SLZ- ذخیره مخزن پایینی RC- تغذیه آب‌های زیرزمینی Q- رواناب کل	UZL- محدوده مخزن بالایی T- دمای هوا TT- دمای آستانه ذوب برف AET- تبخیر و تعرق واقعی
PER- نرخ نفوذ MB- تأخیر رواناب Q0 - رواناب سطحی Q1 - رواناب زیرسطحی Q2 - رواناب پایه	FC- ظرفیت مزرعه SMI- شاخص رطوبت خاک Emp- تبخیر و تعرق پتانسیل LPE- حد تبخیر و تعرق k- ضریب تأخیر ذخیره

شکل ۵- ساختار مدل HBV

مقایسه مدل‌های منتخب

در این بخش تلاش بر مقایسه مدل‌های منتخب بخش قبلی باتوجه‌به معیارهای ارزیابی مختلف است. از آنجایی که مدل‌های توده‌ای و نیمه‌توزیعی منعکس‌کننده رویکردهای متفاوتی برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی هستند، به‌طور جداگانه مقایسه می‌شوند. مقایسه مدل‌های توده‌ای و نیمه‌توزیعی منتخب جدول (۳) به طور خلاصه ارائه شده است. مقایسه باتوجه‌به مقیاس زمانی و مکانی، فرآیند مدل‌سازی، هزینه، تخصص، سهولت استفاده، سیستم عامل، قابلیت‌ها و محدودیت‌ها انجام شده است.

جدول ۳- خلاصه مدل‌های منتخب

نوع مدل	مدل‌های توده‌ای				مدل‌های نیمه‌توزیعی		
معیار ارزیابی	SRM	SIMHYD	AWBM	IHACRES	HBV	SWAT	HEC-HMS
مقیاس زمانی	روزانه	روزانه	روزانه	انعطاف‌پذیر	روزانه و ساعتی	روزانه	انعطاف پذیر
مقیاس مکانی	انعطاف‌پذیر	انعطاف‌پذیر	انعطاف‌پذیر	انعطاف‌پذیر	انعطاف پذیر	انعطاف پذیر	انعطاف پذیر
شبیه‌سازی سیلاب	×	✔	✔	✔	✔	×	✔
شبیه‌سازی رواناب پیوسته	✔	✔	✔	✔	✔	✔	✔
ذخیره و ذوب برف	✔	×	×	×	✔	✔	✔
برگاب و نفوذ	×	✔	×	×	✔	✔	×
تبخیر و تعرق	×	✔	×	✔	✔	✔	✔
هزینه	رایگان	رایگان	رایگان	رایگان	رایگان	رایگان	رایگان
زمان تنظیم (راه اندازی)	متوسط	کوتاه	کوتاه	کوتاه	متوسط	متوسط	کوتاه
تخصص	متوسط	پایین	پایین	پایین	متوسط	متوسط	کم
سهولت استفاده	متوسط	آسان	آسان	آسان	متوسط	متوسط	آسان
سیستم عامل	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows
مزایای استفاده	امکان مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رژیم روناب	کاربری آسان، نیاز به داده‌های اندک، ساختار نسبتاً ساده	کاربری آسان، نیاز به داده‌های اندک، ساختار نسبتاً ساده	کاربری آسان، داده‌های مورد نیاز کم، شبیه‌سازی رویدادی و مستمر	مدل‌سازی تمام فرآیندهای هیدرولوژیکی، نیاز به اطلاعات کم	امکان مدل‌سازی اثر تغییراقلیم بر رژیم رواناب	کاربری آسان، داده‌های مورد نیاز کم، شبیه‌سازی رویدادی و مستمر
محدودیت‌ها	توسعه برای حوضه‌های برفی، رخدادها را نمی‌تواند مدل کند	عدم مدل‌سازی ذوب برف، از نظر زمانی منعطف نمی‌باشد	عدم مدل‌سازی ذوب برف، از نظر زمانی منعطف نمی‌باشد	عدم مدل‌سازی ذوب برف، عدم نیاز به اطلاعات جغرافیایی حوضه	برای گام زمانی روزانه طراحی شده و اطلاعات در دسترس محدود است	وقایع را نمی‌تواند مدل کند، داده‌های ورودی و پارامترهای زیاد	

نتیجه‌گیری

باتوجه‌به قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر مدل و باتوجه‌به نیازها و اهداف مورد انتظار از مدل‌سازی بارش- رواناب در هر حوضه، در نهایت باید مدلی انتخاب شود که در راستای اهداف مسئله باشد. در انتخاب بهترین مدل توده‌ای از بین مدل‌های منتخب مقایسه شده در این پژوهش باتوجه‌به شرایط حاکم بر مسئله و اهداف استفاده از مدل‌سازی، تصمیم‌گیری می‌شود. به‌عنوان مثال در منطقه‌ای که بیشتر اوقات سال پوشش برفی دارد استفاده از مدل SRM مناسب‌ترین گزینه است؛ زیرا در مقایسه شرایط این مدل با مدل‌های دیگر، در کنار اکثر ویژگی‌هایی که مشترک هستند در نظر گرفتن ذخیره و ذوب برف عاملی مهم در انتخاب این مدل خواهد بود و شاید با بررسی دیگر تفاوت‌های این مدل با مدل‌های دیگر و باتوجه‌به شرایط مسئله بهترین تصمیم اتخاذ شود. به‌عنوان نمونه‌ای دیگر در حوضه‌ای که میزان تبخیر و تعرق بالایی دارد انتخاب مدلی که با شرایط یکسان در دیگر پارامترها، توانایی محاسبات تبخیر و تعرق را هم داشته باشد، انتخاب بهینه خواهد بود و یا وقتی داده‌های ورودی مناسب در دسترس است، عملکرد مدل ساده‌ای چون IHACRES نسبت به دیگر مدل‌های پیچیده بهتر است (Carla Carcano و همکاران، ۲۰۰۸). اگرچه انتخاب مدل‌های توده‌ای به جهت سادگی ساختار و حداقل داده‌های مورد نیاز و نیز کاربری آسان آن‌ها در اولویت قرار بگیرند اما در یک انتخاب مناسب‌تر، باید مدل‌های نیمه‌توزیعی، مورد توجه قرار گیرد. به‌عنوان مثال مدل SWAT که در مقایسه‌های صورت گرفته مشخص شد که قابلیت شبیه‌سازی سیلاب را ندارد، و برای مسئله‌ای که هدف اصلی آن شبیه‌سازی سیلاب منطقه است مناسب نخواهد بود. مطالعات Van Liew و همکاران (۲۰۰۳)، Golmohammadi و همکاران (۲۰۱۷) و گودرزی و همکاران (۱۳۹۵) نشان داده است که مدل SWAT برای پیش‌بینی و تخمین تغییرات جریان کارایی خوبی داشته است. از بین مدل‌های نیمه‌توزیعی موقعیتی بین سادگی بیش از حد مدل‌های توده‌ای و داده‌های گسترده مورد نیاز برای

مدل‌های توزیعی می‌باشند. انتخاب بهترین مدل از مدل‌های نیمه توزیعی نیز همانند مدل‌های توده‌ای بسته به شرایط مسئله دارد، HEC-HMS یک بسته بسیار منعطف، عمومی، با رابط گرافیکی کاربر بسیار پیچیده در مقایسه با بسته‌های تجاری گران قیمت می‌باشد. ساختار مدولار آن امکان استفاده از دیگر محصولات HEC را فراهم می‌کند. مزیت اصلی این مدل امکان شبیه‌سازی به‌صورت (رویدادی/ پیوسته) می‌باشد. این مدل از لحاظ اندازه حوضه و گام زمانی انعطاف‌پذیر است. کالیبراسیون و راه‌اندازی مدل آسان بوده و به راحتی کالیبره و راه‌اندازی می‌شود و به‌عنوان بهترین گزینه بین انتخاب‌ها مشاهده می‌شود.

منابع

آبابایی، ب. و سهرابی، ت. ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد SWAT در حوضه آبریز زاینده رود. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاك، ۱۶(۳): ۴۱-۵۸.

آورند، ر.، حمادی، ک. و تراب پوده، ح. ۱۳۸۶. مقایسه نتایج برآورد سیلاب با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-HMS و WMS در حوضه آبریز مارون. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

سعیدی، ر. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز در مناطق بیابانی با استفاده از مدل SWAT، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.

شریفی، ف.، صفارپور، ش. و ایوب زاده، س.ع. ۱۳۸۳. ارزیابی مدل رایانه‌ای AWBM2002 در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی تعدادی از حوزه‌های آبخیز ایران، پژوهش و سازندگی، ۳۵: ۴۲-۶۳.

علیزاده، ا. ۱۳۸۷. اصول هیدرولوژی کاربردی. دانشگاه فردوسی مشهد.

گودرزی، م.ر.، ذهبیون، ب.، مساح بوانی، ع.ر. و کمال، ع.ر. ۱۳۹۱. مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی IHACRES، SWAT و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۱: ۲۵-۴۰.

گودرزی، م.ر.، ذهبیون، ب. و مساح بوانی، ع. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی بارش–رواناب حوضه قره‌سو با استفاده از مدل SWAT. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۱۱: ۱۸-۲۰.

Argent R., Podger G., Grayson R. and Fowler K. 2005. E2 Catchment modeling software User Guide. Corporative Research Centre for Catchment Hydrology.

Arnhjerg - Nielsen K. and Harremoes. 1995. Prediction of hydrological reduction factor and Initial loss in urban surface runoff from small ungaged catchments. Atmospheric Research, 42: 137-147.

Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S. and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. J. American Water Resour. Assoc, 34(1): 73-89.

Arnold J.G. and N. Fohrer. 2005. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. Hydrol. Process., 19(3): 563-572.

Beven K.J. 2000. Rainfall-runoff modelling. The Primer. Wiley, 360.

Borah D.K. and Bera M. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpointsource pollution models: review of mathematical bases. Trans. ASAE., 46(6): 1553-1566.

Borah D.K. and Bera M. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpointsource pollution models: review of applications. Trans. ASAE,. 47(3): 789-803.

Bouabid R. and Chafai Elalaoui A. 2010. Impact of climate change on water resources in Morocco: The case of Sebou Basin. Economics of drought and drought preparedness in a climate change context., 95: 57-62.

Boughton W.C. 1993. A Hydrograph-Based Model for Estimating the Water Yield of Ungauged Catchments, Inst. Engs. Australia, Nat. Conf. Publ., 93(14): 317-324.

Boughton WC. 2004. The Australian Water Balance Model. Environmental Modelling and Software,19(10): 943-956.

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.

Chang T.K., Talei A., Alaghmand S. and Po-Leen Ooi M. 2017. Choice of rainfall inputs for event-based rainfall-runoff modeling in a catchment with multiple rainfall stations using data-driven techniques, Journal of Hydrology, 545: 100–108

Chiew F.H.S., Peel M.C. and Western A.W. 2002. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD, In: Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications (Editors: V.P. Singh and D.K. Frevert). Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA. 335-367.

gridded spatial proximity and gridded integrated similarity approaches against their lumped counterparts. Journal of Hydrology, 550: 279–293.

Loucks D.P., Beek E.V., Stedinger J.R. and Dijkman J.P.M. 2005. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. UNESCO.

Martinez J. 1975. Snowmelt-Runoff Model for stream flow forecasts. Nordic Hydrol, 6(3):145-154.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. and King K.W. 2005. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.

Peel M.C., Chiew F.H.S., Western A.W. and McMahon T.A. 2000. Extension of Unimpaired Monthly Streamflow Data and Regionalisation of Parameter Values to Estimate Streamflow in Ungauged Catchments, Report prepared for the National Land and Water Resources Audit, In Australian Natural Resources Atlas.

Reed S., Schaake J. and Zhang Z.Y.. 2007. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. Journal of Hydrology, v. 337: 402-420.

Shah S.M.S., O'Connell P.E. and Hosking J.R.M. 1996. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 1. Formulation and calibration of a stochastic rainfall field model. Journal of hydrology, v. 175: 67-88.

Sharifi F. and Boyd M.J. 1994. A Comparision of the SFB and AWBM rainfall-runoff models, 25 th Congress of The International Assosiation of Hydrologeologists/ 21-25 November 1994. International Hydrology & Water Resources Symposium of the Institution of Engineers, Australia. ADELAIDE. 491- 495.

SHMI. 2003. Homepage of the Original HBV-Model. URL:

USACE. 2000. HEC-HMS Technical Manual, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 187.

Van Liew M.W., Garbrecht J.D. and Arnold J.G. 2003. Simulation of the impacts of flood retarding structures on streamflow for a watershed in southwestern Oklahoma under dry, average, and wet climatic conditions. J. Soil Water Conserv, 58(6): 340-348.

Dakhlaoui H., Ruelland D., Tramblay Y. and Bargaoui Z. 2017. Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia, Journal of Hydrology, 550 : 2101-217.

Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H. and Arnold J.G. 2007. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. American Society of Agricultural and Biological Engineer, 50(4): 1211-1250.

Golmohammadi G., Rudra R., Dickinson T., Goel G. and Veliz M. 2017. Predicting the temporal variation of flow contributing areas using SWAT, Journal of Hydrology, 547: 375–386.

Haydon S. and Deletic A. 2007. Sensitivity testing of a coupled Escherichia coli –Hydrologic catchment model. Journal of Hydrology, 338: 161–173.

Hewett J.D. and Hibbert A.P. 1967. Factors Affecting Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas, In Forest Hydrology, Edited by W.E. Sopper and H. W. Lull, Pergammon, New York. 275-290.

Horton R.A. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions-American Geophysical Union, 14: 446–460.

http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/index.html .

http://www.mpassociates.gr/software/environment/ihacres.html.

http://www.smhi.se/sgn0106/if/hydrologi/hbv.htm.

http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html/welcome.html.

Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User,s Manual Version 3.5. 2010. Hydrologic Engineering Center.

IHACRES, "User Guide". 2004.

Jakeman A.J. and Hornberger G.M. 1993. How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model? Water Resources Research, 29: 2637-2649

Jones R.N., Chiew H.S., Boughton W.C. and Zhang L. 2006. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. Advances in Water Resources, 29: 1419–1429.

Li H. and Zhang Y. 2017. Regionalising rainfall-runoff modelling for predicting daily runoff: Comparing