Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse)
Vol. 4, No. 1, PP. 4-13, Spring 2019
DOI: 10.22112/jwwse.2019.154018.1117

نشریه علمی- ترویجی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال چهارم، شماره ۱، صفحات ۴-۱۳، بهار ۱۳۹۸

Daily Runoff Prediction in Maroun Basin Using HEC-HMS Model

Abbas Ahmadpor[1], Seyyed Hassan Mirhashemi[2], Parviz Haghighat-Jo[3*]

1- M.Sc. in Water Resources Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
2- PhD, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
* Corresponding author, Email: Parvizhjou@uoz.ac.ir

Received: 29/10/2018
Revised: 28/01/2019
Accepted: 28/01/2019

Abstract

The prediction of stream-flow have incessantly attracted water engineer studies with due regard to its importance in the design of water structures, water intake from the rivers, planning and operation of reservoirs of dams, and erosion and sedimentation control measures in rivers. In this research, HEC-HMS model was used in prediction of daily stream-flow in the Maroun Basin, evaluating the ability and precision of this model in predicting stream-flow. For this purpose, continuous simulation of daily rainfall-runoff was performed before the prediction period using soil moisture accounting algorithm (SMA). In order to calibrate and verify the HEC-HMS model, daily stream-flow data from 1995 to 2006 and from 2007 to 2011 at the Idenak hydrometric Station were respectively used. Then, daily stream-flow at Idenak Station was predicted from 2011 to 2012. The results showed that the goodness of fit tests including Nash-Sutcliffe efficiency index, coefficient of determination and root mean square error in the runoff prediction process at Idenak station are equal to 0.56, 0.67 and 32.2 m^3/s, respectively. Therefore, the HEC-HMS model has acceptable ability and precision in predicting runoff.

Keywords: Idanak station, HEC-HMS model, Nash-Sutcliffe coefficient, Prediction of stream-flow, Simulation of rainfall-runoff.

پیش‌بینی رواناب روزانه درحوضه مارون با استفاده از مدل HEC-HMS

عباس احمدپور[۱]، سید حسن میرهاشمی[۲]، پرویز حقیقت‌جو[۳*]

۱ - کارشناس ارشد، مهندسی منابع آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران .
۲ - دکترای آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳ - عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: Parvizhjou@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۰۷
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

چکیده

پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با توجه به اهمیت آن در طراحی تأسیسات آبی، آبگیری از رودخانه‌ها، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از مخازن سدها و کنترل فرسایش و رسوب رودخانه‌ها از دیرباز مورد توجه مهندسان آب بوده است. در این تحقیق به پیش‌بینی روزانه رواناب در حوضه مارون با مدل HEC-HMS پرداخته می‌شود، تا توانایی و دقت این مدل در پیش‌بینی رواناب ارزیابی شود. بهاین منظور ابتدا شبیه‌سازی پیوسته بارش-رواناب به‌صورت روزانه قبل از زمان پیش‌بینی با استفاده از مدل تلفات شمارش رطوبت خاک (SMA) انجام شد. به‌منظور واسنجی مدل HEC-HMS از داده‌های دبی روزانه سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۸۵ و صحت‌سنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ در ایستگاه هیدرومتری ایدنک استفاده شد. رواناب روزانه در ایستگاه ایدنک از تاریخ ۱۳۹۰/۷/۱ تا ۱۳۹۱/۸/۱۴ پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهد که آزمون‌های نیکویی برازش شامل ضریب ناش-ساتکلایف، ضریب تعیین و ریشه میانگین مربعات خطا در مرحله پیش‌بینی رواناب در ایستگاه ایدنک به‌ترتیب برابر ۰/۵۶، ۰/۶۷ و ۳۲/۲ مترمکعب در ثانیه است. بنابراین مدل HEC-HMS از دقت و توانایی قابل‌قبول در پیش‌بینی رواناب برخوردار است.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی رواناب، مدل HEC-HMS، شبیه‌سازی بارش-رواناب، ضریب ناش-ساتکلیف، ایستگاه ایدنک.

۱- مقدمه

پیش‌بینی رواناب به‌منظور بهره‌برداری موثر از مخازن کنترل سیل و سامانه‌های سیل بندهای خاکی و بتنی ضروری است. از این‌رو پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است. پیش‌بینی‌ها همچنین ممکن است با برآورد زمان و محدوده خسارات موردانتظار یا شرایط مخرب سیل، بهره‌برداری اضطراری را پشتیبانی نماید. پیش‌بینی‌ها بر مبنای شرایط هواشناسی و هیدرولوژیکی اخیر در حوضه هستند و ممکن است شرایط هواشناسی پیش‌بینی شده در آینده را شامل شوند. اگرچه اکثر کاربردها در زمینه پیش‌بینی سیل است، پیش‌بینی رواناب ممکن است تامین آب، انرژی برق آبی، نیازهای زیست‌محیطی و دیگر نیازهای بهره‌برداری را پشتیبانی نماید.

خضریان نژاد و همکاران (۱۳۹۱) به پیش‌بینی رواناب با استفاده از پیش‌بینی کمی بارش حاصل از برونداد مدل‌های پیش‌بینی عددی جو پرداختند. برای پیش‌بینی بارش از مدل WRF و برای پیش‌بینی رواناب از مدل HEC-HMS استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مقادیر رواناب پیش‌بینی شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای است. غفوری و همکاران (۱۳۹۲) مدل‌سازی پیوسته جریان روزانه در حوضه کارون به کمک مدل تلفات SMA انجام دادند. نتایج حاصل توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی پیوسته جریان در دوره صحت‌سنجی و اعتبارسنجی را نشان داد. یعقوبی و مساح (۱۳۹۳) سه مدل HBV، IHARCES و HEC-HMS را برای شبیه‌سازی پیوسته بارش-رواناب در حوضه‌های نیمه خشک بررسی نمودند. در تعیین عملکرد مدل ها از معیار عملکرد ضریب نش، ضریب تعیین و معیار RMSE استفاده کردند. پارامترهای ذخیره‌سازی خاک، نفوذ و ذخیره‌سازی کششی خاک به‌عنوان پارامترهای حساس مدل HEC-HMS مشخص شدند که تاثیر زیادی بر نتایج خروجی مدل دارند، این درحالی است که مدل IHARCES به میزان یکسان از خود حساسیت نشان داده‌است.

معصوم‌زاده و فتحیان (۱۳۹۵) به شبیه‌سازی پیوسته بارش-رواناب در حوضه دز با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند. نتایج بیانگر آن است که مدل HEC-HMS به‌همراه مدل تلفات SMA از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی پیوسته رواناب کل روزانه در دوره‌های خشک و تر متوالی در حوضه دز برخوردار است. آن‌ها مدل‌سازی هیدرولوژیکی پیوسته را با HMS در منطقه کارستی آگتلک با استفاده از الگوریتم SMA انجام دادند. نتایج نشان دادکه مدل توانسته نتایج معقول را به‌دست آورد اما نیاز به تصحیح بیشتر پارامترها وجود دارد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی پیوسته جریان با استفاده از الگوریتم SMA در حوضه آبریز وامسادهارا هند توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی جریان در دوره صحت‌سنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد (Singh and Jain., 2015). شبیه‌سازی جریان بالادست حوضه رودخانه نیل با استفاده از مدل HEC-HMS نشان داد که پارامترهای SMA و مدل مخزن خطی بیشترین تأثیر را در تولید هیدروگراف خروجی حوضه داشته، همچنین توانایی مدل در دوره صحت‌سنجی تائید شده است (Sintayehu et al., 2015; Sup et al., 2015). مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه رودخانه ون را با استفاده از مدل HEC HMS با بهره‌گیری از الگوریتم تلفات SMA انجام دادند. با در نظرگرفتن عملکرد مدل در شبیه‌سازی رواناب، نتیجه گرفته شد که مدل HEC-HMS کالیبره‌شده را می‌توان برای پیش‌بینی رواناب حوضه رودخانه ون استفاده کرد.

رزمخواه و همکاران (۲۰۱۶) فرایند بارش-رواناب در حوضه آبریز سد کارون ۳ را با روش تلفات نفوذ SMA در مدل HEC-HMS مدل‌سازی نمودند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با توجه به معیار ناش-ساتکلیف، روش SMA برآورد مناسبی از نفوذ ارایه می‌کند. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره کلارک و زمان تمرکز مهمترین پارامترها برای شبیه سازی حداکثر سیلاب هستند. مدل‌سازی بارش-رواناب را در ۱۰ زیر حوضه آبریز مختلف دارای آمار و بدون آمار رواناب (فاقد ایستگاه) با نرم افزار HEC-HMS در زیمبابوه توسط (Gumindoga et al. 2016) انجام شد.

داده‌های میانگین ماهانه جریان را در حوزه آبریز Cekerek ترکیه مورد بررسی قرار داده و یک SARIMA (1,0,0) * (0,1,1) 12 به آن برازش شد (Şengül and can., 2011). نتایج آن‌ها نشان‌دهنده کارایی و دقت مدل مذکور در مدل‌سازی بود. Yurekli et al. (2005) مدل ARIMA (0,1,1) را برای داده‌های ماهانه در ایستگاه سنجش آساکیکداردیک در رودخانه کاراسو برازش دادند Valipour et al., (2012) به پیش‌بینی ماهانه جریان ورودی به مخزن سد دز با استفاده از مدل اتورگرسیو شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. نتایج تحقیقات نشان داد که بهترین مدل برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد دز، مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی خودکار رگرسیونی بوده که قادر به پیش‌بینی جریان در ۵ سال آینده است. توانایی مدل میانگین متحرک فصلی (SARIMA) و مدل میانگین متحرک (ARIMA) برای پیش‌بینی بلندمدت رواناب در ایالات متحده توسط (Valipour, 2015) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت مدل SARIMA بیشتر از مدل ARIMA است. همچنین سهم هر یک از زیرحوضه‌های فاقد آمار در تولید رواناب خروجی حوضه بررسی و محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل میزان رواناب و دبی پیک حوضه را در حوضه‌های دارای آمار بطور مناسبی پیش‌بینی می‌کند.

با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون می‌توان دریافت که در زمینه شبیه‌سازی تک‌واقعه و پیوسته بارش-رواناب در حوضه‌های آبریز، تأثیر توسعه شهری بر دبی اوج سیل و تعیین پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها در حوضه‌های مختلف مطالعاتی انجام شده است. اما در زمینه پیش‌بینی جریان آبراهه در حوضه‌های آبریز با مدل HEC-HMS مطالعه‌ای تاکنون انجام نشده است. بنابراین هدف از این مقاله ارزیابی دقت مدل مفهومی HEC-HMS در پیش‌بینی جریان روزانه آبراهه در حوضه مارون می‌باشد.

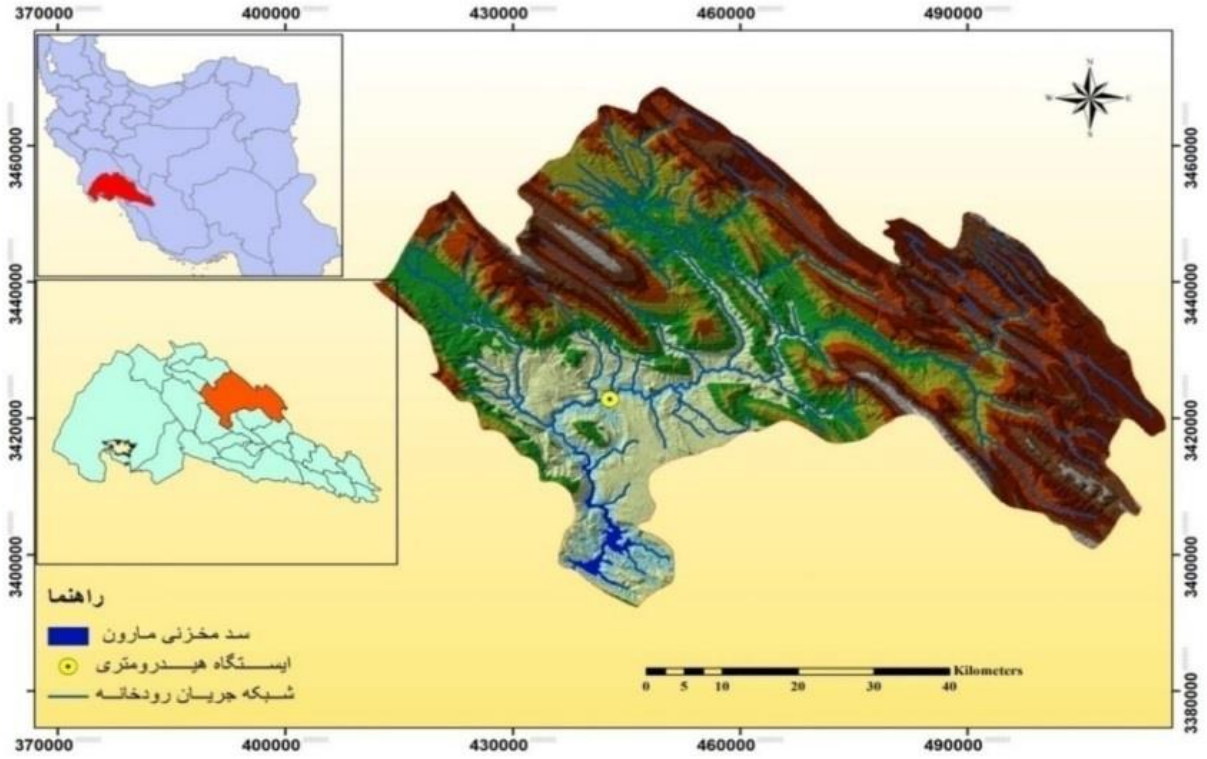
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه موردمطالعه

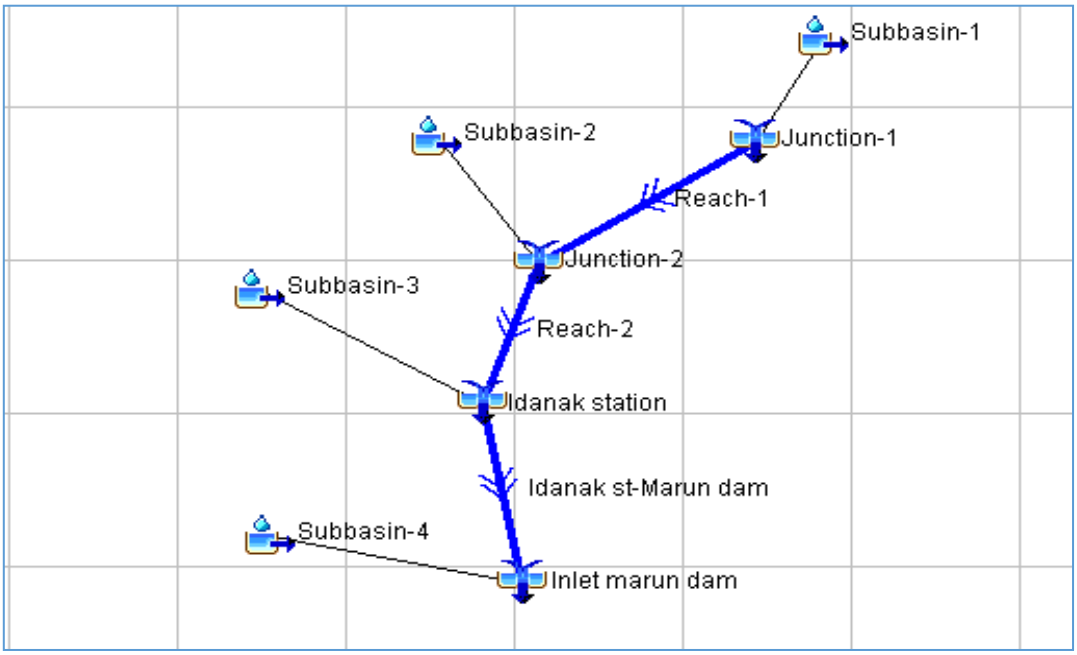
حوضه مارون با مساحت حدود ۳۸۲۴ کیلومترمربع در مختصات جغرافیای (′۵۰ °۴۹) تا (′۱۰ °۵۱) طول شرقی، (′۳۰ °۳۰) تا (′۲۰ °۳۱) عرض شمالی و در ارتفاعات شهرستان بهبهان در استان خوزستان واقع‌شده است. حوضه آبریز مارون توسط حوضه‌های آبریز رودخانه‌های زهره و کارون در استان خوزستان و کهگیلویه و بویراحمد احاطه شده است. بخش عمده حوضه آبریز رودخانه مارون را مناطق کوهستانی تشکیل می‌دهد. از این میان بخش‌های شمالی و شرقی به‌ترتیب نسبت به بخش‌های دیگر ارتفاع بیشتری دارند. حوضه آبریز مارون تا محل سد مارون بر اساس توپوگرافی و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری با استفاده از نرم‌افزار ARCGIS به چهار قسمت تقسیم‌شده و هر یک به‌عنوان یک زیرحوضه به مدل حوضه معرفی‌شده است. شکل ۱ نقشه زیرحوضه‌بندی را همراه با شماره‌های مربوط به هر زیر حوضه و موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری را نشان می‌دهد. شماتیک مدل هندسی حوضه مارون در محیط مدل HEC-HMS در شکل ۲ ارائه شده است. مشخصات هندسی زیرحوضه‌ها نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. داده‌های بارندگی از آمار ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به وزارت نیرو تهیه‌شده است. مقادیر دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری ایدنک متعلق به وزارت نیرو برای کالیبراسیون مدل استفاده‌شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی زیر حوضه‌های حوضه مارون.

زیر حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	ضریب گراولیوس	حداقل ارتفاع (متر)	حداکثر ارتفاع (متر)	ارتفاع متوسط (متر)	شیب متوسط حوضه (درصد)	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)
۱	۹۱۷/۵	۱۷۲/۹	۰/۰۷۲	۱۳۳۹	۳۴۹۱	۲۴۱۵/۰۲	۷/۱	۳۲/۰۲
۲	۶۸۶/۶	۷۳/۶	۰/۰۳۵	۸۵۹	۳۳۲۱	۲۰۷۹/۰۶	۹/۴	۴۱/۹
۳	۱۰۶۷/۴	۸۷/۵	۰/۰۴۷	۵۶۷	۳۱۶۵	۱۸۶۴/۵	۷/۹	۷۰/۶
۴	۱۰۲۰/۳	۹۵/۲	۰/۰۵۴	۳۶۲	۳۱۱۷	۱۷۴۶/۸	۸/۶	۷۳/۳



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک) (زلکی بدیلی و همکاران، ۱۳۹۱)



شکل ۲- شماتیک مدل هندسی حوضه مارون در محیط مدل HEC-HMS

۲-۲- پیش‌بینی رواناب با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

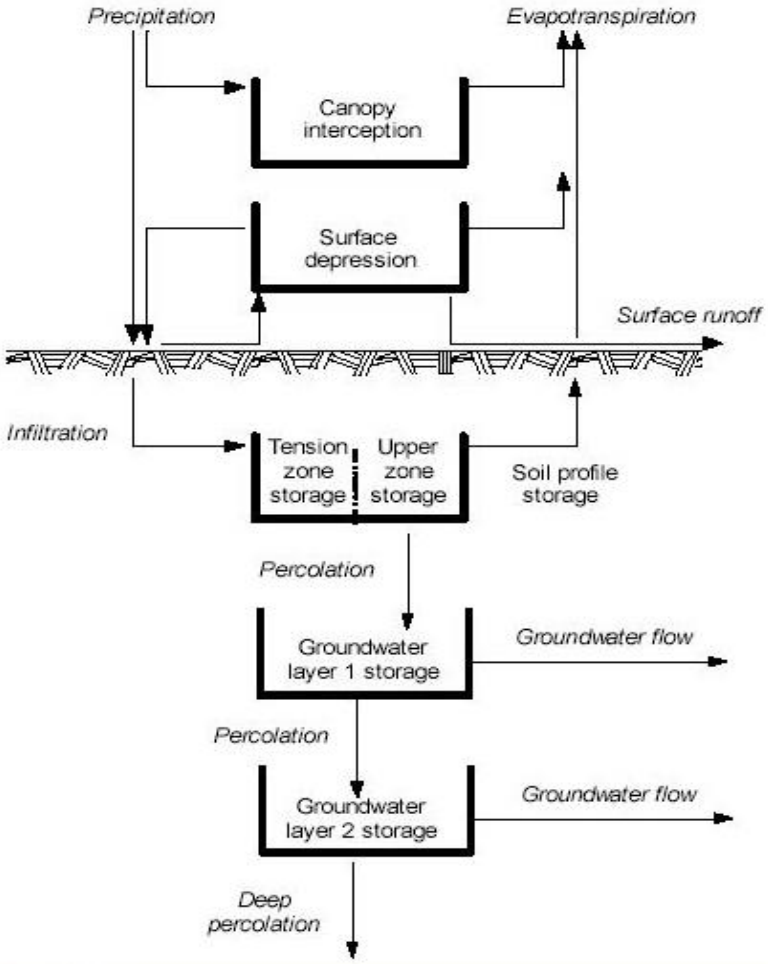
مدل HEC-HMS یکی از پرکاربردترین مدل‌های بارش-رواناب در ایالت متحد آمریکا است. این مدل یک مدل مفهومی نیمه‌توزیعی بوده که دارای قابلیت شبیه‌سازی تلفات و نفوذ، ذوب برف، روندیابی زیرحوضه‌ها و روندیابی شبکه رودخانه‌ها است. در نسخه جدید این مدل، قابلیت پیش‌بینی جریان (forecasting stream flow) اضافه شده است. پیش‌بینی رواناب معمولا شامل شبیه‌سازی شرایط گذشته و آینده است. پیش‌بینی با انتخاب زمان پیش‌بینی شروع می‌شود. معمولا زمان پیش‌بینی آخرین زمان موجود برای مشاهدات هواشناسی بارش روزانه، دمای هوا روزانه و بقیه متغیرها است. اگر مشاهدات رواناب، اشل و رقوم سطح آب در مخزن موجود باشد، آخرین مقدار موجود عموما نزدیک به زمان پیش‌بینی است. شبیه‌سازی به‌صورت ساعتی یا روزانه قبل از زمان پیش‌بینی شروع می‌شود. نتایج محاسبه‌شده بین زمان شروع و زمان پیش‌بینی به‌عنوان دوره Look back نامیده می‌شود. هنگامی که مشاهدات شرایط فعلی حوضه موجود باشد، با نتایج محاسبه‌شده در دوره Look back مقایسه می‌شوند تا اصلاحات کالیبراسیون، انجام شده و عملکرد مدل را بهبود ببخشد.

معمولا مشاهدات هواشناسی بعد از زمان پیش‌بینی موجود نیستند و پیش‌بینی مقادیر آینده استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال پیش‌بینی کمی بار (QPF)، پیش‌بینی هواشناسی مقدار بارش آینده را تهیه می‌کند. پیش‌بینی‌های مشابه برای بقیه متغیرهای هواشناسی مانند دمای روزانه نیز استفاده می‌شود. رواناب آینده برمبنای شرایط هواشناسی پیش‌بینی‌شده شبیه‌سازی می‌شود. این دوره از زمان در آینده، دوره پیش‌بینی (forecast time) نامیده می‌شود. زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها در یک آلترناتیو پیش‌بینی با مقادیر پیش‌فرض با استفاده از مقادیر پارامترهای مدل حوضه مقداردهی می‌شوند. مقادیر پارامترها در المان‌ها ممکن است برای پیش‌بینی بدون تغییر در مقادیر پارامترهای اصلی در مدل حوضه اصلاح شوند. این برای اصلاح پارامترها لازم نیست. با این‌وجود اکثر پیش‌بینی‌ها نیاز به اصلاح پارامترها برای اعمال شرایط فعلی حوضه به‌علت شرایط فعلی هواشناسی را شامل می‌شوند.

۲-۳- انتخاب مدل‌های محاسبه تلفات، جریان پایه، تبدیل رواناب و روندیابی

به‌منظور شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب، برای مدل تلفات شمارش رطوبت خاک (SMA) استفاده شد. مدل SMA تنها مدل پیوسته در این نرم‌افزار بوده و علاوه‌بر جدید بودن آن، توانایی مدل‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیکی را برای دوره‌های طولانی‌مدت به‌صورت پیوسته دارد. (HEC, 2000) این مدل با استفاده از یک‌سری لایه‌های ذخیره‌کننده، حوضه آبریز را معرفی می‌نماید. هنگامی‌که بارش صورت می‌گیرد اولین لایه‌ای که ظرفیت آن پر می‌شود ذخیره برگابی است. دومین لایه ذخیره‌ای، ذخیره چالابی است و سپس نفوذ سطحی رخ می‌دهد. لذا سومین لایه ذخیره، ذخیره پروفیل خاک است. آب مازاد بر ذخایر مذکور به‌صورت رواناب سطحی ظاهر می‌شود. پروفیل خاک براثر تبخیر و تعرق، بخشی از آب خود را از دست می‌دهد و بخشی از آب آن توسط نفوذ عمقی به لایه‌های آب زیرزمینی می‌رسد. ذخایر آب زیرزمینی به مدل مخزن خطی برای مدل‌سازی جریان پایه رودخانه مرتبط می‌شود.

شکل ۳ طرح شماتیک و مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک را نشان می‌دهد. همچنین از بین مدل‌های مختلف تبدیل بارش به رواناب، مدل هیدروگراف واحد کلارک به‌دلیل استفاده عمومی‌تر در حوضه‌های بزرگ و عملکرد قابل‌قبول آن استفاده شد. همچنین بنابر توصیه-های صورت‌گرفته به‌همراه مدل SMA از مدل جریان پایه مخزن خطی برای برآورد جریان پایه بهره گرفته شد. برای روندیابی هیدروگراف در طی بازه‌ها رودخانه نیز روش روندیابی ماسکینگام انتخاب شد. علاوه‌بر این با توجه به برف‌گیر بودن حوضه برای مدل‌سازی ذوب برف از روش شاخص دما هوای روزانه استفاده شد.



شکل ۳- طرح شماتیک و مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک (HEC, 2000)

۳-۲- کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

به‌منظور کالیبراسیون مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی پیوسته جریان، از داده¬های دبی روزانه از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵ و برای صحت‌سنجی مدل از داده¬های از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ در ایستگاه هیدرومتری ایدنک استفاده شد. پیش‌بینی رواناب در ایستگاه ایدنک از تاریخ ۱۳۹۰/۸/۱۴ تا ۱۳۹۱/۸/۱۴ انجام شد. پارامترهای کالیبراسیون برای هر زیرحوضه شامل ۱۴ پارامتر مربوط به مدل تلفات SMA، ۶ پارامتر مربوط به مدل مخزن خطی و ۲ پارامتر مربوط به مدل تبدیل بارش به رواناب کلارک است. پارامترهای کالیبراسیون برای هر آبراهه شامل ۲ پارامتر مربوط به ضرایب X و K ماسکینگام است. با توجه به این‌که تعداد زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه مارون به‌ترتیب برابر با ۴ و ۳ است، تعداد کل پارامترها برای کالیبراسیون مدل HEC-HMS برابر با ۹۴ به‌دست می‌آید. بنابراین با توجه به تعداد زیاد پارامتر، کالیبراسیون مدل زمان‌بر است.

مدل مخزن خطی که برای تهیه جریان پایه مورداستفاده قرار می‌گرفت با مدل SMA رابطه مستقیم داشته و ضرایب آب‌های زیرزمینی برای هر دو مدل به یکدیگر وابسته هستند. عملیات کالیبراسیون مدل می‌تواند به‌صورت دستی و با استفاده از قضاوت مهندسی به‌روش سعی و خطا و یا به‌صورت خودکار توسط مدل انجام گیرد. چنانچه داده‌های هیدرومتری در نقاط درونی حوضه و خروجی زیر حوضه‌ها وجود داشته باشد، این امر به کالیبراسیون زیرحوضه‌ها کمک زیادی خواهد نمود. در حوضه مارون عمل کالیبراسیون مدل فقط در ایستگاه هیدرومتری ایدنک به‌صورت دستی با تصحیح مکرر پارامترها در هربار اجرای مدل صورت گرفته است.

برای مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده در مراحل کالیبراسیون؛ صحت‌سنجی و

پیش‌بینی مدل، از شاخص‌های نیکوئی برازش مختلفی می‌توان استفاده نمود. این شاخص‌ها به دو گروه معیارهای گرافیکی و پارامترهای آماری سنجش خطا قابل‌تقسیم هستند. از دسته معیارهای گرافیکی می‌توان به ترسیم هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در کنار هم اشاره کرد. از شاخص‌های آماری سنجش خطا می‌توان به ضریب تعیین[1]، ضریب ناش-ساتکلایف[2]، درصد خطای حجمی کل[3] و ریشه میانگین مربعات خطا[4] اشاره کرد که به‌ترتیب در روابط ۱ تا ۴ آمده است. ضریب ناش-ساتکلایف بیانگر راندمان مدل بوده که اخیراً در مسائل هیدرولوژی به‌وفور مورداستفاده قرارگرفته است. ضریب ناش-ساتکلایف می‌تواند مقادیری از منفی بینهایت تا یک را به‌خود اختصاص دهند که عدد یک، نشان‌دهنده برازش کامل و انطباق ۱۰۰٪ بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده است.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}} \quad (۱)$$

$$\mathrm{NS} = 1 - [\frac{\sum_{i}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i}^{n}(O_i - \bar{O})^2}] \quad (۲)$$

$$\mathrm{PTVE} = \frac{\sum_{i}^{n} O_i - \sum_{i}^{n} S_i}{\sum_{i}^{n} O_i} * 100 \quad (۳)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2} \quad (۴)$$

که n: تعداد داده‌های جریان، O_i و S_i: داده‌های جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در گام زمانی iام، $\bar{O}$: دبی میانگین مشاهده‌ای و $\bar{S}$ و $\bar{O}$: به ترتیب میانگین دبی پیش‌بینی و مشاهداتی هستند.

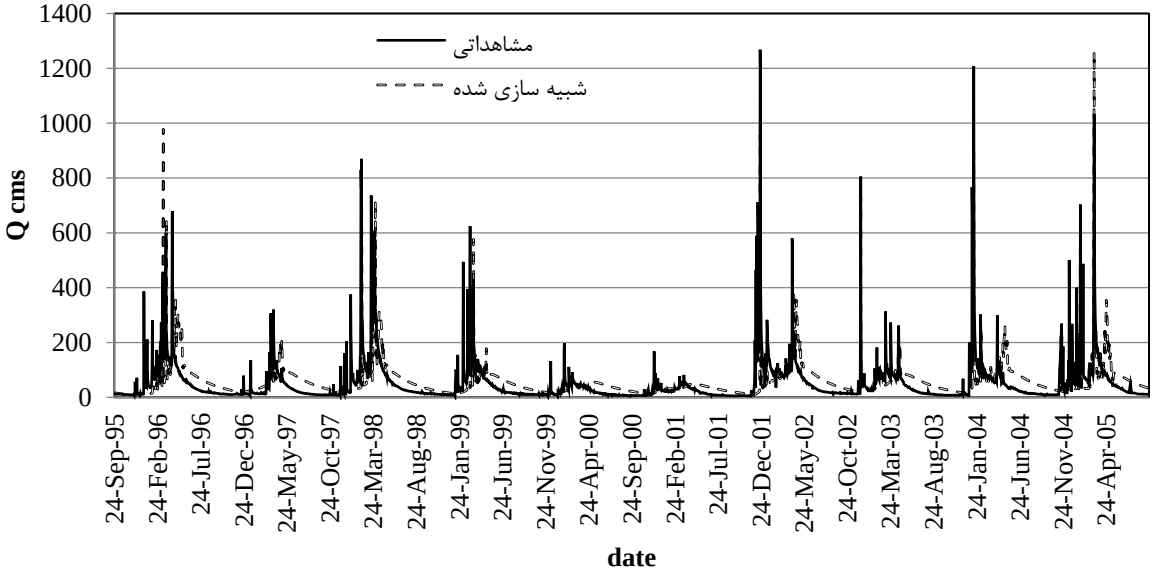
۳- نتایج و بحث

پس از هر اجرای مدل، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل و بررسی چگونگی کالیبراسیون مدل، هیدروگراف جریان شبیه‌سازی‌شده با مدل HEC-HMS با هیدروگراف جریان مشاهداتی مقایسه شد. همچنین شاخص‌های آماری سنجش خطای مدل محاسبه و با مقادیر شاخص‌های آماری در اجرای قبل مقایسه شد. چنانچه دقت مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب مناسب تشخیص داده نمی‌شد، عملیات شبیه‌سازی دوباره تا حصول نتایج رضایتبخش از سر گرفته می‌شد. جدول ۲ مقادیر نهایی پارامترهای مدل ذخیره برگابی، ذخیره سطحی و تبدیل بارش به رواناب کلارک حاصل از واسنجی مدلHEC-HMS را نشان می‌دهد. جدول‌های ۳ الی ۵ به ترتیب مقادیر نهایی پارامترهای مدل مخزن خطی، مدل تلفات SMA و مدل روندیابی ماسکینگام حاصل از واسنجی مدل HEC-HMS را نشان می‌دهد.

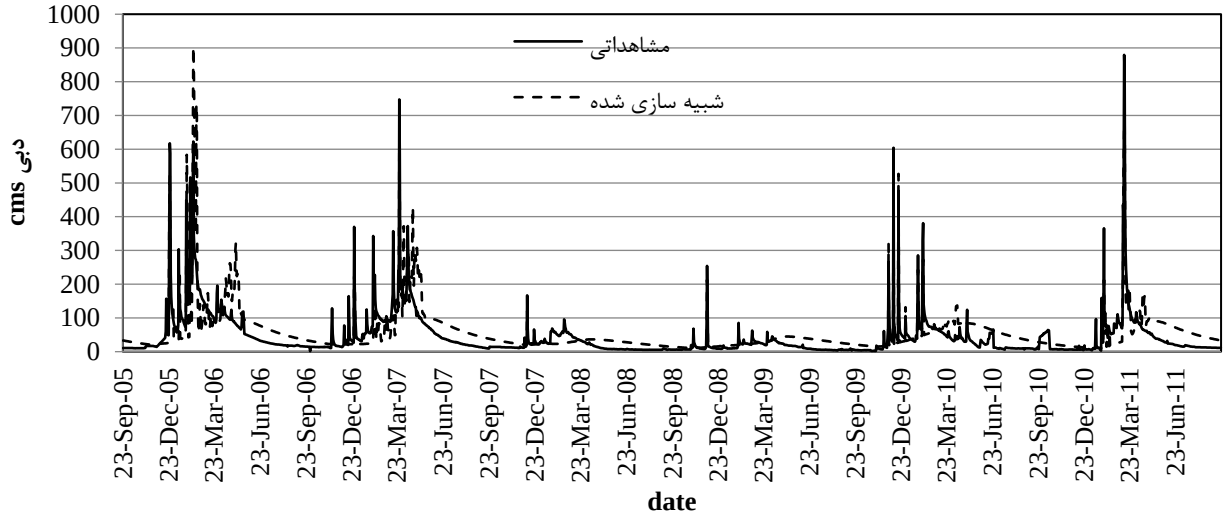
شکل‌های ۴ الی ۶ نیز مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به ترتیب در مراحل واسنجی، صحت‌سنجی و پیش‌بینی مدل HEC-HMS را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان دریافت که مدل HEC-HMS در برآورد دبی جریان با مقادیر کم و پایه نسبت به دبی‌های اوج از دقت خوبی برخوردار است. نتایج تحقیق غفوری و همکاران (۱۳۹۱) در حوضه کارون نشان داد که کارایی مدل HEC-HMS در تخمین مقادیر دبی کم بهتر بوده و بیشترین منبع خطای مدل در برآورد دبی‌های اوج بوده است. علت آن این است که اولاً داده های موجود به‌صورت پیوسته و مستمر در هر روز شامل بارش روزانه، دبی جریان روزانه، دمای هوای روزانه و تبخیر و تعرق روزانه برای شبیه سازی پیوسته فرآیند بارش-رواناب در طول حداقل یک سال آبی بصورت روزانه است. در حالی‌که پارامترهای زمانی برآورد شده در زیرحوضه‌ها شامل زمان تمرکز، زمان تأخیر و ضریب ذخیره کلارک به‌صورت ساعتی است. ثانیاً هیدروگراف جریان در ایستگاه هیدرومتری در طول یک سال آبی در اکثر روزهای سال به‌صورت جریان پایه با مقادیر دبی کم و با تعداد کم مقادیر جریان سیلابی با دبی اوج شدید است. مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده با مدل HEC-HMS در شکل ۶ نشان می‌دهد که شکل تغییرات هیدروگراف پیش‌بینی‌شده نسبتا مناسب است.

جدول ۶ معیارهای آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون، صحت‌سنجی و پیش‌بینی مدل HEC-HMS را نشان می‌دهد. به توجه به جدول ۶، درصد خطای حجمی کل بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی مدل برابر با ۲۳/۱- درصد بوده که بیانگر کم برآورد بودن مدل در برآورد حجم کل رواناب ولی با دقت نسبتا قابل قبول است. مقدار ریشه میانگین مربعات خطا بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله کالیبراسیون مدل برابر با ۵۱/۲ متر مکعب در ثانیه بوده که بیانگر دقت خوب مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب است.

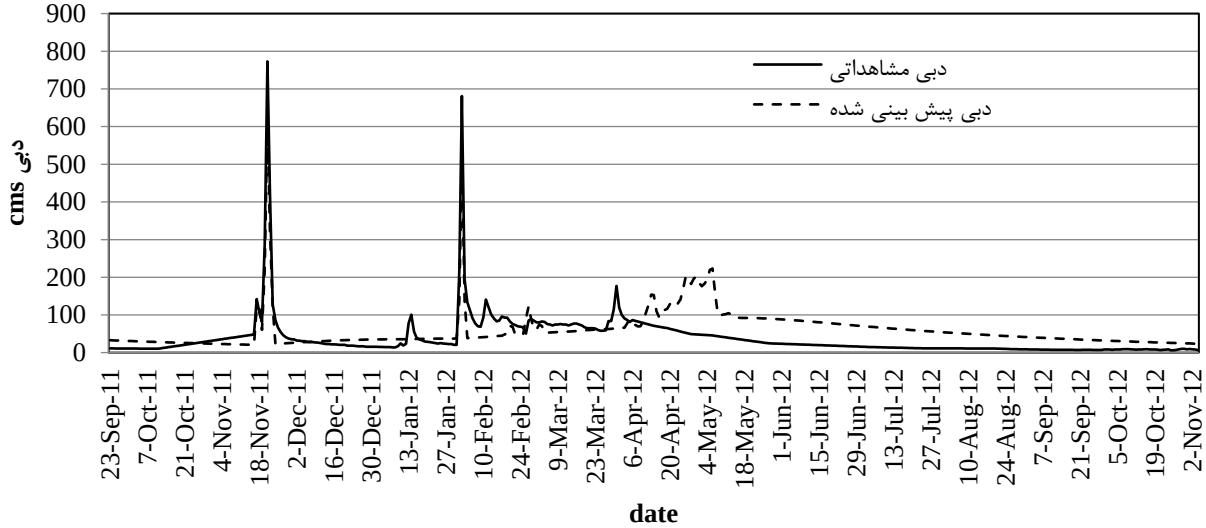
مقدار ضریب ناش-ساتکلایف برای مرحله واسنجی مدل ۰/۶۴ به‌دست آمده که بیانگر دقت قابل‌قبول مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه مارون است. مقدار ضریب ناش-ساتکلایف، ریشه میانگین مربعات خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل به‌ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۴۸/۵ مترمکعب در ثانیه بوده که نشان‌دهنده کالیبراسیون مناسب مدل است. ضمنا به توجه به جدول ۶، درصد خطای حجمی کل بین رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل برابر با ۲۱/۶- درصد بوده که مشابه مرحله واسنجی مدل بیانگر کم برآورد بودن مدل در برآورد حجم کل رواناب ولی با دقت نسبتا قابل قبول است.



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با مدل HEC-HMS در مرحله واسنجی مدل



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با مدل HEC-HMS در مرحله صحت‌سنجی مدل



شکل۶- مقایسه هیدروگراف رواناب مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده با مدل HEC-HMS

جدول ۲- مقادیر نهایی پارامترهای مدل ذخیره برگابی، ذخیره سطحی و تبدیل بارش به رواناب کلارک حاصل از واسنجی مدل HEC-HMS

زیرحوضه	مدل ذخیره برگابی		مدل ذخیره سطحی		روش تبدیل بارش به رواناب کلارک	
	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)	Initial Storage (%)	Max Storage (mm)	t_c (hr)	R Clark (hr)
۱	۰	۶	۰	۷	۷/۴۲	۵/۰۵
۲	۰	۵/۵	۰	۶/۳	۵/۹۷	۵/۸۶
۳	۰	۵	۰	۵/۵	۷/۰۸	۷/۹۳
۴	۰	۵/۲	۰	۴/۷	۵/۸۳	۸/۰۹

جدول ۳- مقادیر نهایی پارامترهای مدل مخزن خطی حاصل از واسنجی مدل HEC-HMS

زیرحوضه	مخزن آب زیرزمینی اولیه ($m^3/s/km^2$)	ضریب آب زیرزمینی لایه اول (HR)	مخزن آب زیرزمینی لایه اول	مخزن اولیه آب زیرزمینی لایه دوم ($m^3/s/km^2$)	ضریب آب زیرزمینی لایه دوم (HR)	مخزن آب زیرزمینی لایه دوم
۱	۰/۰۰۵	۱۰۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۰۰۰	۱
۲	۰/۰۰۵	۱۲۵۰	۱	۰/۰۰۱	۲۲۰۰	۱
۳	۰/۰۰۵	۱۵۰۰	۱	۰/۰۰۱	۲۵۵۰	۱
۴	۰/۰۰۵	۱۷۵۰	۱	۰/۰۰۱	۲۸۰۰	۱

جدول ۴- مقادیر نهایی پارامترهای مدل تلفات SMA حاصل از واسنجی مدل HEC-HMS

زیرحوضه	۱	۲	۳	۴
درصد رطوبت اولیه خاک	۸/۵	۶	۵	۴
درصد مقدار آب زیرزمینی درلایه اول	۱۴	۱۲/۵	۱۰	۹/۳
درصد مقدار آب زیرزمینی درلایه دوم	۱۸	۱۶	۱۵	۱۴/۵
حداکثر نفوذ (میلی‌متر در ساعت)	۳۵	۳۸	۴۰	۳۴
درصد غیرقابل نفوذ	۰	۰	۰	۰
ذخیره خاک (میلی‌متر)	۱۲۰	۱۱۵	۱۱۰	۱۱۵
تنش ذخیره‌ای (میلی‌متر)	۲۰	۲۰	۱۸	۲۰
نفوذ خاک (میلی‌متر در ساعت)	۶	۷	۷/۵	۸
درصد ذخیره آب زیرزمینی در لایه اول (میلی‌متر)	۱۶۵	۱۵۰	۱۴۵	۱۷۰
نفوذ آب زیرزمینی در لایه اول (میلی‌متر در ساعت)	۳/۵	۴	۴/۵	۵
ضریب آب زیرزمینی در لایه اول	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۷۵۰
ذخیره آب زیرزمینی در لایه دوم (میلی‌متر)	۱۸۰	۱۶۰	۱۷۰	۱۸۰
نفوذ آب زیرزمینی در لایه دوم (میلی‌متر در ساعت)	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۰۲۶	۰/۰۵

جدول ۵- مقادیر نهایی پارامترهای مدل روندیابی ماسکینگام حاصل از واسنجی مدل HEC-HMS

بازه یا آبراهه	K (hr)	x
Reach-1	۲/۸۵	۰/۳۵
Reach-2	۳/۰۴	۰/۳
Idanak st-Marun Dam	۴/۰۹	۰/۲۵

جدول ۶- معیارهای آماری نیکوئی برازش برای دوره کالیبراسیون، صحت‌سنجی و پیش‌بینی

معیارهای آماری	واسنجی	صحت‌سنجی	پیش‌بینی
R^2	۰/۷۲	۰/۶۹	۰/۶۷
NS	۰/۶۴	۰/۶۲	۰/۵۶
PTVE (%)	-۲۳/۱	-۲۱/۶	-۱۸/۳
RMSE (cms)	۵۵/۲	۴۸/۵	۳۲/۲

با توجه به جدول ۶، مقدار ضریب ناش-ساتکلایف و ریشه میانگین مربعات خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده به‌ترتیب برابر با ۰/۵۶، ۳۲/۲ مترمکعب در ثانیه بوده که بیانگر دقت قابل‌قبول مدل در پیش‌بینی رواناب در حوضه مارون است. ضمنا با توجه به درصد خطای حجمی کل بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده برابر با ۱۸/۳- درصد در دوره پیش‌بینی، می‌توان دریافت که مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای متناظر با آن است. نتایج تحقیق خضریان نژاد و همکاران (۱۳۹۱) در پیش‌بینی رواناب با مدل HEC-HMS با استفاده از بارش پیش‌بینی شده با مدلWRF، نشان داد که مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای است.

۴- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی بارش-رواناب با مدل HEC-HMS نشان می‌دهد که مدل HEC-HMS در برآورد دبی جریان با مقادیر کم و پایه نسبت به دبی‌های اوج از دقت خوبی برخوردار است. علت آن این است که اولاً داده های ورودی مدل های موجود به‌صورت پیوسته و مستمر شامل بارش، دبی جریان، دمای هوا روزانه و تبخیر و تعرق روزانه برای شبیه‌سازی پیوسته فرآیند بارش-رواناب به‌صورت روزانه است. در حالی‌که پارامترهای زمانی برآورد شده در زیرحوضه‌ها شامل زمان تمرکز، زمان تأخیر و ضریب ذخیره کلارک به‌صورت ساعتی است. با توجه به مقدار ضریب ناش-ساتکلایف و ریشه میانگین مربعات خطا بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده می‌توان دریافت که دقت مدل HEC-HMS در پیش‌بینی رواناب در حوضه مارون قابل‌قبول است. علاوه‌بر این با توجه به درصد خطای حجمی کل بین هیدروگراف مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده برابر در دوره پیش‌بینی، می‌توان دریافت که مقادیر رواناب پیش‌بینی‌شده کمتر از مقادیر مشاهده‌ای متناظر با آن است.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- R^2
2- Nash-Sutcliffe (NS)
3- Percent of Total Volume Error (PTVE)
4- Root Mean Square Error (RMSE)

۶- مراجع

خضریان‌نژاد، ن.، حجام، س.، میرزایی، ا.، و مشکواتی، ا.ح.، (۱۳۹۱)، "پیش‌بینی رواناب حوضه آبریز تیره با استفاده از پیش‌بینی کمی بارش خروجی مدل WRF"، *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۲، ۵۳-۶۸.

زلکی بدیلی، ن.، صیاد، غ.ع.، حمادی، ک.، اخوان، س.، و عبدی، ع.، (۱۳۹۱)، "شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک) با استفاده از مدل SWAT"، *مهندسی زراعی (مجله علمی کشاورزی)*، ۳۵(۲)، ۲۵-۳۶.

غفوری، م.ر.، ثقفیان، ب.، طاهری شهرآئینی، ح.، و باقری شورکی، س.، (۱۳۹۱)، "مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه کارون به کمک مدل تابع تلفات SMA"، *مجله تحقیقات منابع آب*، ۹، ۷۳-۷۷.

معصوم زاده، س.، و فتحیان، ح.، (۱۳۹۵)، "تفکیک جریان پایه از رواناب کل در حوضه دز با استفاده از مدل HEC-HMS"، *سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.*

یعقوبی، م.، و مساح بوانی، ع.، (۱۳۹۳)، "تحلیل حساسیت و مقایسه عملکرد سه مدل مفهومی HBV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش-رواناب پیوسته در حوضه‌های نیمه‌خشک (بررسی موردی: حوضه اعظم هرات-یزد)"، *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۰(۲)، ۱۵۳-۱۷۲.

Gumindoga, W., Rwasoka, D. T., Nhapi, I., and Dube, T., (2017), "Ungauged runoff simulation in Upper Manyame catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model", *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 100, 371-382.

Hydrologic Engineering Center (HEC), (2000), " Hydrologic modeling system HEC–HMS: Technical reference manual", U.S. Army Corps of Engineers", Hydrologic Engineering Center, Davis, California.

Koch, R., and Bene, K., (2013), "Continuous hydrologic modelling with HMS in the Aggtelek Karst region". *Hydrology*, 1(1), 1-7.

Razmkhah H. Saghafian B. Akhoundali A.M., and Radmanesh F., (2016), "Rainfall_runoff modeling considering soil moisture accounting algorithm, Case study: Karoon III river basin", *Water Resources* 43(4), 699-710.

Şengül, S., and Can, İ., (2011), "Stochastic modelling of mean monthly flows of Karasu river, in Turkey", *Water and Environment Journal*, 25(1), 31-39.

Singh, W.R., and Jain, M.K., (2015), "Continuous hydrological modeling using soil moisture accounting algorithm in Vamsadhara river basin, India", *Journal Water Resources Hydraulic Engineering*, 4(4), 398-408.

Sintayehu, L.G., (2015), "Application of the HEC-HMS model for runoff simulation of Upper Blue Nile river basin", *Hydrology Current Research*, 6(2), 2-8.

Sup, M.S., Taley, S.M., and Kale, M.U., (2015), "Rainfall-runoff modeling using HEC HMS for Wan river basin", *International Journal of Research in Engineering Science and Technologies*, 1(8), 20-28.

Valipour, M., (2015), "Long–term runoff using SARIMA and ARIMA models in the United States", *Meteorological Applications*, 22, 592–598.

Valipour, M., Banihabib, M.E., and Behbahani, S.M.R., (2012), "Monthly inflow forecasting using

autoregressive artifical neural network", *Journal of Applied Sciences*, 12(20), 2139-2147.

Yurekli, K., Kuruc, K., Ozturk, F., (2005), "Application of linear stochastic models to monthly flow data of Kellkit stream", *Ecological Modeling*, 183, 67-75.