

## کارایی روش منحنی‌های تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی

### (مطالعه موردی: حوضه آبخیز زولاچای)

ابراهیم یوسفی مبرهن<sup>1\*</sup>، کامبخش فرحمند<sup>2</sup>، نفیسه فهیم<sup>3</sup>، عماد فهیم<sup>4</sup>

خارپخ دریافت: 93/11/16 خارپخ پذیرش: 94/11/12

1- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

2- اسنادپار گروه علوم اقتصادی، دانشگاه پیام نور رشت

3- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

4- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [e.yousefi.m@gmail.com](mailto:e.yousefi.m@gmail.com)

### چکیده

منحنی تداوم جریان، برای طرح‌های مدیریت منابع آب، از قبیل طراحی سدها، نیروگاه‌های برق‌آبی، عملیات آبخیزداری، ارزیابی خطر خشک‌سالی، و بررسی سلامت زیست‌بوم رودخانه، اهمیت فراوانی دارد و در طرح‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌ها در نظر گرفته شود. هدف این مطالعه، بررسی کارایی روش منحنی‌های تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل احتساب کننده رطوبت خاک (HMS SMA) با مقیاس‌های زمانی سالانه، نیم‌سالانه، فصلی و ماهانه است تا میزان تأثیر رطوبت خاک در ایجاد رواناب در حوضه آبخیز زولاچای تعیین شود. در این تحقیق پس از مدل‌سازی فرم هندسی حوضه آبخیز زولاچای در الحاقیه HEC-GeoHMS، پارامترهای مدل احتساب کننده رطوبت خاک تخمین زده شد و سپس شبیه‌سازی بارش- رواناب در سایر مقیاس‌های زمانی انجام گرفت. با بررسی منحنی‌های تداوم جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف با مدل HMS SMA می‌توان نتیجه گرفت که منحنی‌های تداوم جریان در مقیاس زمانی ماهانه، دقیق‌تر از مقیاس زمانی سالانه، نیم‌سالانه و فصلی عمل می‌کند. این نتایج، کارایی دقیق‌تر مقیاس زمانی ماهانه نسبت به سایر مقیاس‌های زمانی در شبیه‌سازی بارش- رواناب را تأیید می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، صحت‌سنجی، منحنی تداوم جریان، مدل احتساب کننده رطوبت خاک، مدل-

های هیدرولوژیکی

## Efficiency of Flow-Duration Curves Method for Verification of a Hydrological Model (Case Study: Zola-Chay Watershed)

E Yousefi Mobarhan<sup>1\*</sup>, K Farahmand<sup>2</sup>, N Fahim<sup>3</sup>, E Fahim<sup>4</sup>

Received: 05 February 2015

Accepted: 01 February 2016

1- Ph.D Student, Range and Watershed Management Dept., Faculty of Natural Resources, Univ. of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran

2-Assist. Prof., Economic Sci. Dept., Univ. of Payam Noor, Iran

3- M.Sc. Graduate, Range and Watershed Management Dept., Faculty of Natural Resources, Univ. of Urmia, Iran

4- M.Sc. Graduate, Range and Watershed Management Dept., Faculty of Natural Resources, Univ. of Hormozgan, Iran

\* Corresponding Author, Email: [e.yousefi.m@gmail.com](mailto:e.yousefi.m@gmail.com)

### Abstract

The flow-duration curve, has a great importance in design of dams, hydroelectric powers plants, watershed operations, drought risk assessment and checking the river ecosystems health, so it is better to be employed in the rivers hydrological plans. The aim of this study is to evaluate the efficiency of flow duration curves for verification of the Soil Moisture Accounting (SMA) model, in different time scales such as annual, semi-annual, seasonal and monthly modes to determine the effect of soil moisture on runoff generation in the Zola-Chay watershed. In this study, after the Zola-Chay watershed geometrical modeling using HEC-GeoHMS, soil moisture accounting model parameters were estimated and then rainfall-runoff simulation was done in different time scales. By examining flow-duration curves in different time scales with SMA model, it could be concluded that the flow-duration curves in the monthly time scale, were more accurate than the annual, semi-annual and seasonal time scales. These results endorsed the more accurate performance of monthly time scale compared with other time scales in rainfall-runoff simulation.

**Keywords:** Flow-duration curve, Hydrological models, Sensitivity analysis, Soil moisture accounting model, Verification

### مقدمه

(میرمهدی 1388). مدل‌های هیدرولوژیکی در مسائل متنوعی شامل پیش‌بینی زمان واقعی سیلاب تا طراحی سازه‌های آبی و سیاست‌های پیشگیری از اثرات وقایع حدی هیدرولوژیکی (سیل و خشک‌سالی) مورد استفاده قرار می‌گیرند. برخی از مدل‌های هیدرولوژیکی مانند مدل HEC-HMS امکان ارتباط با زیر نرم‌افزارها، مانند سامانه اطلاعات جغرافیایی (HEC-GeoHMS) را دارد

یکی از پایه‌های اصلی در مدیریت و کنترل سیل در حوضه‌ها، مدل‌سازی و پیش‌بینی وقوع سیل هست. امروزه استفاده از مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش- رواناب برای دسترسی به خصوصیات سیلاب از قبیل زمان رسیدن به دبی اوج متداول شده است

استفاده کردند. این زیرحوضه‌ها، دارای سطح کوچک، کشیدگی نسبتاً کم، شیب تند و سنجه‌های کمیاب<sup>6</sup> هیدرولوژی مشخص شدند. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که مقادیر شبیه‌سازی جریان با مقادیر مشاهداتی دارای تطابق خوبی می‌باشند. رضاییان‌زاده (1388) کاربرد مدل استانفورد چهار و مدل احتساب کننده رطوبت خاک (HMS SMA) را در برآورد دبی متوسط روزانه، دبی‌های اوج، حجم سیلاب ماهیانه و سالیانه در حوضه آبخیز خسرو شیرین از زیر حوضه‌های حوضه آبخیز سد ملاصدرا در استان فارس را بررسی نمود. نتایج نشان داد که مدل HMS SMA در شبیه‌سازی دبی‌های روزانه، دبی‌های اوج و حجم جریان ماهیانه، و مدل استانفورد در شبیه‌سازی حجم جریان سالیانه نتایج دقیق‌تری را می‌دهند. غلامی و همکاران (1390) با کمک مدل HEC-HMS تأثیر فعالیت‌های بشر در تشدید ایجاد رواناب و خطر سیلاب حوضه آبخیز کسلیان بررسی نمودند. در این بررسی یک مدل بارش- رواناب با به‌کارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی الحاقیه (HEC-GeoHMS) و مدل هیدرولوژیک HEC-HMS ارائه شد. برای ارائه مدل هیدرولوژیک از روش SCS استفاده گردید و مدل بهینه‌سازی شده با شش واقعه دیگر سیلاب اعتبار یابی شد. سپس تغییرات کاربری اراضی و همچنین توسعه مناطق مسکونی و جاده‌ها در مدل هیدرولوژیک اعتبارسنجی شده وارد و اثر آن‌ها در تشدید ایجاد رواناب و خطر سیلاب در طی چهار سال اخیر به‌طور کمی مورد بررسی قرار گرفت. دستورانی و همکاران (1389) ارزیابی و واسنجی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سد طرق را با استفاده از

که این باعث ارتباط درست و سریع‌تر شده و روند بررسی هرگونه پیشامد هیدرولوژی را در زمان کوتاه‌تری ممکن می‌سازد (جهانگیر و همکاران 1387). ضمن اینکه منحنی تداوم جریان نشان‌دهنده رابطه بین فراوانی و مقدار دبی است و داده‌های دبی جریان آب، به‌شکل منحنی تداوم جریان، به‌عنوان پیش‌نیاز، برای طرح‌های مدیریت منابع آب از قبیل اجرای عملیات آبخیزداری حائز اهمیت بوده و باید در هر طرح هیدرولوژی برای رودخانه‌ها انجام شود.

بنت و پتر (2000) در شبیه‌سازی جریان پیوسته حوضه آبخیز لیتل (که در بخش چروکی<sup>1</sup> از ایالت جرجیا واقع شده) از مدل<sup>2</sup> HMS SMA استفاده نمودند. در این تحقیق مقایسه جریان‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و همچنین مقادیر دبی های اوج و حجم جریان جمعی در طول زمان نشان داد که الگوریتم SMA در ساختن مقادیر شبیه‌سازی شده، دقیق و از کارآیی بالایی برخوردار است. فلمینگ و نیری (2004) مدل‌سازی هیدرولوژیکی را در حوضه رودخانه کامبرلند<sup>3</sup> واقع در کنتاکی<sup>4</sup> جنوبی را با استفاده از مدل پیوسته HMS SMA انجام دادند. در این مطالعه، پارامترها به‌صورت فصلی، سالیانه و نیم‌سال به‌کار گرفته شده بودند و مدل نیم‌سال به‌دلیل نتایج بهتر و همچنین بدون نیاز به واسنجی، پیشنهاد گردید. همچنین گارسیا و همکاران (2008) در 12 زیر حوضه در شمال اسپانیا از مدل یکپارچه<sup>5</sup> HMS SMA برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی

- 1- Cherokee
- 2- Hydrologic Modeling System Soil Moisture Accounting
- 3- Cumberland
- 4- Kentucky
- 5- Lumped
- 6- Scarcely gauged

منطقه‌ای منحنی تداوم جریان از عواملی چون بارندگی متوسط سالانه، مساحت حوضه، منحنی هیپسومتر، و طول آبراهه اصلی استفاده کردند. عرب خدري (1377) با مطالعه رودخانه‌های حوضه دریاچه ارومیه، گزارش کرد که رسوبدهی به‌دست‌آمده با منحنی تداوم جریان حدود 79 تا 90 درصد مقدار محاسبه‌شده با روش دبی متوسط روزانه است. تخمین کم‌تر رسوبدهی در روش منحنی تداوم جریان به تأثیر عمل متوسط‌گیری مربوط است. صرف‌نظر از ایراداتی که به استفاده از منحنی تداوم جریان وارد است، اصولاً استفاده از آن در شرایط فن‌آوری موجود مورد سؤال است. برآورد رسوب-دهی سالانه با روش متکی بر محاسبه رسوبدهی روزانه، هم از نظر افزایش میزان دقت و هم کاهش زمان، مناسب‌تر از روش منحنی تداوم جریان است. ماختین (2001) بیان می‌کند که منحنی جریان می‌تواند برای داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری به‌صورت سالانه، ماهانه، و روزانه و همچنین، بر اساس طول کل دوره آماری و یا دوره مشترک آماری ایجاد شود. زینانلو (2003) رابطه متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی حوضه را با دبی‌های متناظر با منحنی تداوم جریان، در 25 ایستگاه، در حوزه آبخیز ارومیه، بررسی کرد. در این مدل‌ها، عوامل پستی‌وبلندی، درجه حرارت سالانه، مساحت، ارتفاع خروجی حوضه، تراکم زهکشی، بارندگی سالانه، شاخص نفوذپذیری، و شاخص برف مدنظر قرار گرفت. متغیر تراکم زهکشی و شاخص نفوذپذیری در همه معادلات وارد شد. کاسترلین و همکاران (2004) سه روش مختلف آماری، پارامتری و گرافیکی را برای منطقه‌ای نمودن منحنی تداوم جریان در حوضه‌های آبخیز بدون آمار به کار بردند. این محققان عدم قطعیت منحنی تداوم

نرم‌افزار HEC-HMS انجام دادند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار الحاقیه (2012) HEC-GeoHMS نقشه حوضه را تهیه نمودند. در این تحقیق واسنجی شماره منحنی و میزان تلفات اولیه با کاربرد روش نلدر و مید انجام‌شده و بهینه شدند. شماره منحنی و میزان تلفات اولیه حوضه توسط نرم‌افزار مورد واسنجی قرار گرفت و بهینه‌سازی شد. با مقایسه میزان تلفات اولیه برابر با 0/2S (بیشینه‌گیری بالقوه)، با مقدار برآورد شده بعد از واسنجی آن‌ها دریافتند که فرض مذکور برای حوضه آبخیز سد طرق مناسب هست. موسی نژاد و همکاران (1390) مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه آبریز هلیل رود با استفاده از مدل HMS SMA و مقایسه آن با شبکه عصبی-فازی تطبیقی بر مبنای خوشه‌بندی کاهشی انجام دادند. از نتایج مدل‌سازی حوضه هلیل می‌توان دریافت که میزان تغییرات در زیرحوضه هلیل بسیار زیاد است که به‌خاطر کارهای آبخیزداری است که در این حوضه صورت می‌گیرد و این مسئله کار مدل‌سازی را مشکل می‌سازد. یوسفی و همکاران (1392) واسنجی مدل هیدرولوژیکی احتساب‌کننده رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی متفاوت برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبخیز زولاچای را تحقیق نمودند. بررسی مقیاس‌های زمانی واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل HMS SMA نشان داد که مقیاس زمانی ماهانه در شبیه‌سازی بارش-رواناب دقیق‌تر از مقیاس‌های زمانی دیگر عمل می‌کند، همچنین دریافتند که مقیاس زمانی فصلی می‌تواند بهتر از سایر مقیاس‌های زمانی دبی اوج را تخمین بزند.

میمی کو و کامکی (1985) روش‌های منطقه‌ای کردن منحنی تداوم جریان را در غرب و شمال‌غرب یونان بررسی کردند. این محققان برای ارائه مدل

شبیه‌سازی بارش - رواناب استفاده‌شده است ولی هیچ‌کدام، از روش منحنی‌های تداوم جریان در صحت-سنجی مدل بارش - رواناب استفاده نکرده‌اند، لذا در این مطالعه، کارآیی روش منحنی‌های تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل احتساب‌کننده رطوبت خاک که از مدل‌های پیوسته<sup>8</sup> در شبیه‌سازی بارش - رواناب هست موردبررسی قرار گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### - منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز زولاچای به‌عنوان بخشی از حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، در جنوب غربی شهرستان سلماس در استان آذربایجان غربی در منطقه مرزی ایران و ترکیه واقع شده است. این حوضه با مساحت 823 کیلومترمربع در محدوده 55' 37° تا 4' 38° عرض‌های شمالی و 13' 44° تا 35' 44° طول‌های شرقی واقع شده است. مرتفع‌ترین نقاط حوضه در امتداد مرز بین ایران و ترکیه در دامنه کوه هراول داغ و کوه قرا داش به ارتفاع 3000 متر و کم ارتفاع‌ترین نقطه حوضه دارای ارتفاع 1450 متر از سطح دریا در محل خروجی زولاچای هست. خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه و نقشه سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌ترتیب در شکل 1 و جدول 1 نمایش داده شده است.

#### روش تحقیق

در این تحقیق از بارش‌های 24 ساعته تنها ایستگاه موجود در زولاچای واقع در 5 کیلومتری خروجی حوضه استفاده گردید. یک دوره آماری شش‌ساله (82-86) انتخاب شد، به‌طوری‌که سه سال

جریان منطقه‌ای را ارزیابی کردند و روش ارزیابی متقاطع جک نایف را در منطقه وسیعی، در مرکز ایتالیا، به‌کار بردند. بر اساس نتایج ارزیابی محققان، منحنی تداوم جریان منطقه‌ای در حوضه‌های آبخیز بدون آمار مناسب است و سه روش مورد استفاده مشابه هم هستند. الکارز و پالائو (2010) پنجاهویک خصوصیت هیدرولوژیکی و فیزیکی حوضه آبخیز Ebro در اسپانیا را برای 46 حوضه آبخیز تعیین و متغیرهای موردبررسی را در پنج گروه همگن بررسی کردند. سپس، برای کاهش بعد داده‌ها به تحلیل مؤلفه‌های اصلی هر گروه پرداختند و از مؤلفه‌های اصلی مشخص‌شده در تحلیل خوشه‌ای استفاده کردند و حوضه‌های آبخیز مشابه را در 4 گروه تقسیم کردند. سپس، با استخراج Q95 یا دبی‌ای که در 347 روز از سال بزرگتر از آن باشد از منحنی تداوم جریان حقایق زیست‌محیطی را هم در حوضه‌های آبخیز دارای آمار و هم فاقد آمار تخمین زدند. شاعری و همکاران (2012) با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، نیاز محیط زیستی شهر چای را از رودخانه‌های اصلی حوضه غربی دریاچه ارومیه، برآورد کردند. آن‌ها با بررسی و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های مختلف، مانند تنانت، انتقال منحنی تداوم جریان و غیره در رودخانه شهر چای، به این نتیجه رسیدند که مقادیر محاسباتی از روش انتقال منحنی تداوم جریان، به‌دلیل در نظر گرفتن خصوصیات اکولوژیکی اکوسیستم رودخانه، نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد. با مرور منابع می‌توان نتیجه گرفت که علی‌رغم اینکه تاکنون مطالعات زیادی برای شبیه‌سازی بارش - رواناب با روش مدل تک رویدادی یا منقطع<sup>7</sup> و روش مدل‌های پیوسته در

7- Single Event Models or Event Basin

8- Continuous Model

اول از این دوره آماری برای واسنجی مدل و سه سال بعد برای صحت‌سنجی مدل انتخاب گردید.

#### مدل حوضه

مدل حوضه از پارامترها و داده‌های مرتبط با عناصر هیدرولوژیکی شامل زیرحوضه‌ها، بازه‌های روندیابی، محل اتصال آبراهه‌ها مخازن، چشمه، منبع و محل انحراف آب رواناب زیرحوضه‌ها تشکیل شده است که می‌تواند به صورت یکپارچه و یا توزیعی در نظر گرفته شود. در این مطالعه، مدل فیزیکی حوضه آبخیز با به‌کارگیری الحاقیه HEC-Geo HMS به‌عنوان رابط بین GIS و HEC-HMS در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>9</sup> و مدل ارتفاعی رقومی<sup>10</sup> شبیه‌سازی شد (خرم مرگاوی و همکاران 1387). این برنامه جانبی به دلیل داشتن قابلیت تولید فایل مدل حوضه، نیاز ساختن این مدل به صورت دستی را برطرف می‌نماید که این امر، خود منجر به کاهش خطاهای احتمالی می‌گردد (دستورانی و همکاران 1389). سپس مدل فیزیکی حوضه به محیط نرم‌افزار HEC HMS وارد گردید. در این مطالعه از مدل پیوسته احتساب‌کننده رطوبت خاک برای مدل‌سازی تلفات و برای تبدیل بارش اضافی به رواناب از روش هیدروگراف واحد کلارک استفاده شد (گارسیا و همکاران 2008). همچنین به دلیل استفاده از مدل احتساب‌کننده رطوبت خاک، باید از روش مخزن خطی برای جداسازی جریان پایه استفاده شود (رضائیان-زاده و همکاران 2010).

#### مدل پیوسته احتساب‌کننده رطوبت خاک

درحالی‌که مدل‌های پیوسته مستعد استخراج هیدروگراف‌های خروجی حوضه در دوره‌های زمان

طولانی (معمولاً یک سال و بیشتر) می‌باشند لذا از تنها مدل پیوسته موجود در HEC HMS که مدل SMA هست استفاده گردید. این مدل قادر است تغییرات مقدار رطوبت خاک را بین رویدادهای بارندگی در زمان‌های مختلف و رفتار شرایط خشک و تر حوضه آبخیز را شبیه‌سازی کند و اطلاعات بیشتری از وضعیت هیدرولوژیکی حوضه در اختیار ما قرار دهد. مدل SMA بر اساس مدل بارندگی - رواناب لیوسلی (1983) که جزییات آن توسط بنت (1998) تشریح شد، در شکل 2 طراحی گردیده است. این مدل حرکت آب و ذخیره آن را در گیاهان، سطح خاک و عمق خاک و لایه‌های زیرزمینی شبیه‌سازی کرده و با داشتن مقدار بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET) مدل جریان سطحی و جریان آب زیرزمینی، تلفات ناشی از ET نفوذ را روی کل حوضه آبخیز محاسبه می‌کند.

#### تخمین مقادیر اولیه و محدوده پارامترها

دوازده پارامتر برای مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی گیرش گیاهی، ذخیره چالابی، نفوذ، ذخیره خاک، نفوذ عمقی و ذخیره آب زیرزمینی موردنیاز است. علاوه بر بارش، تنها ورودی دیگر به الگوریتم SMA میزان تبخیر-تعرق پتانسیل است (بی‌نام 2012). از این دوازده پارامتر، چهار پارامتر (ضرایب و عمق ذخیره آب زیرزمینی 1 و 2) توسط تحلیل فروکش جریان آب رودخانه زولاچای از داده‌های مشاهداتی دبی تخمین زده شد (جمس و بارگر 1982).

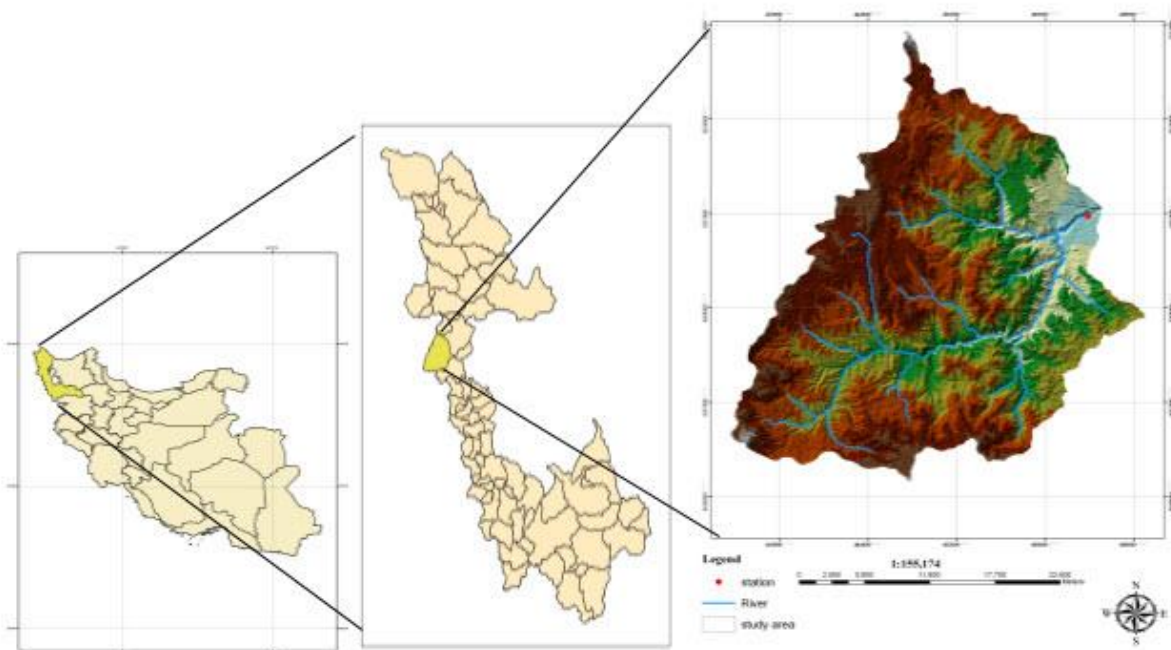
[1]

$$q_t = q_0 \times K_r^t$$

$q_t$  = میانگین جریان روزانه در زمان آینده  
مطابق با جریان اولیه ( $q_0$ )،  $K_r$  = ثابت فروکش و  $t$  = زمان به روز است.

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی حوضه آبخیز زولاچای.

حوضه آبخیز	مساحت (km <sup>2</sup> )	محیط (km)	ارتفاع میانگین بیشتر (m)	شیب میانگین کمتر (m)	طول رودخانه اصلی (km)	متوسط بارندگی سالانه (mm)	دبی بیشتر (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	دبی کمتر (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
زولاچای	823	40	2225	1450	53/43	395	88/1	0/02



شکل 1- سیمای عمومی حوضه آبخیز زولاچای، شبکه آبراهه‌ها و ایستگاه هیدرومتری چهریق علیا.

2، تنها پارامتری است که با روش مذکور قابل تخمین نیست. این پارامتر مفهومی، تنها از طریق واسنجی مدل تعیین می‌شود. تعدادی دیگر از پارامترها به دلیل موجود نبودن داده‌های موردنیاز، از طریق واسنجی مدل به دست می‌آوریم. ابتدا مقادیر اولیه‌ای را با توجه به حد بالا و پایین داده‌شده برای پارامترها که در راهنمای مدل آمده، انتخاب و سپس حساسیت مدل به پارامترهای مختلف سنجیده شد. با یافتن پارامترهای

لایه‌های آب زیرزمینی در مدل SMA، فرآیند جریان‌های ورودی افقی در خاک را بیان می‌کند. این مدل شامل دو لایه آب زیرزمینی است. در طی این فرآیند آب از ذخیره پروفیل خاک به ذخیره آب زیرزمینی ملحق می‌شود. آب نفوذی از پروفیل خاک وارد لایه اول می‌شود. آب ذخیره‌شده از لایه اول آب زیرزمینی به لایه دوم آب زیرزمینی و سپس به لایه‌های عمیق‌تر نفوذ می‌کند نرخ نفوذ عمقی آب زیرزمینی

همکاران 1392)، لذا مقایسه منحنی‌های تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل HMS SMA در مقیاس‌های زمانی متفاوت این مطلب را تأیید می‌کند که پیش‌بینی‌های صحیح و مناسبی در جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب در سال‌های 85-88 صورت گرفته است. منحنی‌های تداوم جریان برای صحت‌سنجی مدل HMS SMA در شکل‌های 3 تا 6 ارائه شده است. در این مطالعه منحنی تداوم جریان مدل مربوطه در سال‌های آبی 85-88 مطالعه و رسم شده است، که به دلیل محدودیت مکانی، فقط سال آبی 88-87 ارائه گردید. بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که مدل احتساب-کننده رطوبت خاک پیش‌بینی‌های خوبی را در جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب ارائه کرده‌اند به طوری که در هر 4 مقیاس زمانی، بیش از 50 درصد مواقع دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بر هم منطبق شده‌اند.

همچنین نتیجه فوق این مطلب را تأیید می‌کند که واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی HMS SMA در شبیه‌سازی بارش-رواناب به‌درستی صورت گرفته است. بررسی دقیق منحنی‌های تداوم جریان سال 88-87 در مقیاس‌های زمانی سالانه، نیم‌سالانه، فصلی و ماهانه نشان می‌دهد که مدل با مقیاس زمانی ماهانه پیش‌بینی بهتری را از سایر مقیاس‌ها ارائه نموده است، به طوری که بیش از 75 درصد مواقع دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بر هم منطبق شده‌اند درحالی‌که منحنی‌های تداوم جریان در سه مقیاس دیگر از انطباق کمتری برخوردار هست، همچنین بررسی کارایی روش منحنی تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل احتساب‌کننده رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی مختلف در سال‌های آبی 88-85 در جدول 2 نشان می‌دهد که مقیاس زمانی ماهانه با داشتن ضریب تبیین بالاتر و مجموع مربعات خطا پایین‌تر نسبت به

حساس و بهینه‌کردن مقادیر پارامترها، مدل اجرا گردید. بر اساس تحقیقات فلمینگ و نیری (2004)، داودی و ادونال (1965) و جمس و بارگر (1982) جهت واسنجی مدل یکپارچه، سال‌های آماری موجود به دو قسمت تقسیم می‌گردد. قسمت اول برای واسنجی پارامترهای مدل و قسمت دوم برای صحت‌سنجی<sup>11</sup> مدل واسنجی شده بکار می‌روند. جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل HMS SMA، یک دوره آماری شش-ساله (86-82) انتخاب شد، به طوری که سه سال اول از این دوره آماری (سال‌های آبی 85-82) برای واسنجی مدل و سه سال بعد (سال‌های آبی 88-85) برای صحت‌سنجی مدل انتخاب گردید.

#### منحنی تداوم جریان

منحنی تداوم جریان در برنامه‌ریزی‌های آب رودخانه جهت استفاده‌های شرب و یا احداث بندهای انحرافی برای استفاده از آب در کشاورزی حائز اهمیت بوده و باید در هر طرح هیدرولوژی برای رودخانه‌ها انجام شود. نخستین مطالعه جامع بر روی منحنی تداوم جریان را سارسی، در سال 1959 میلادی، انجام داد. منحنی تداوم جریان یکی از روش‌های ارزنده است با اطلاعاتی مفید که همه دبی‌های رودخانه اعم از کم و جریان سیلابی را نمایش می‌دهد. این منحنی رابطه بین مقادیر دبی و درصد است را ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر، رابطه بین بزرگی و فراوانی دبی رودخانه را نشان می‌دهد (اسماختین 2001).

#### نتایج و بحث

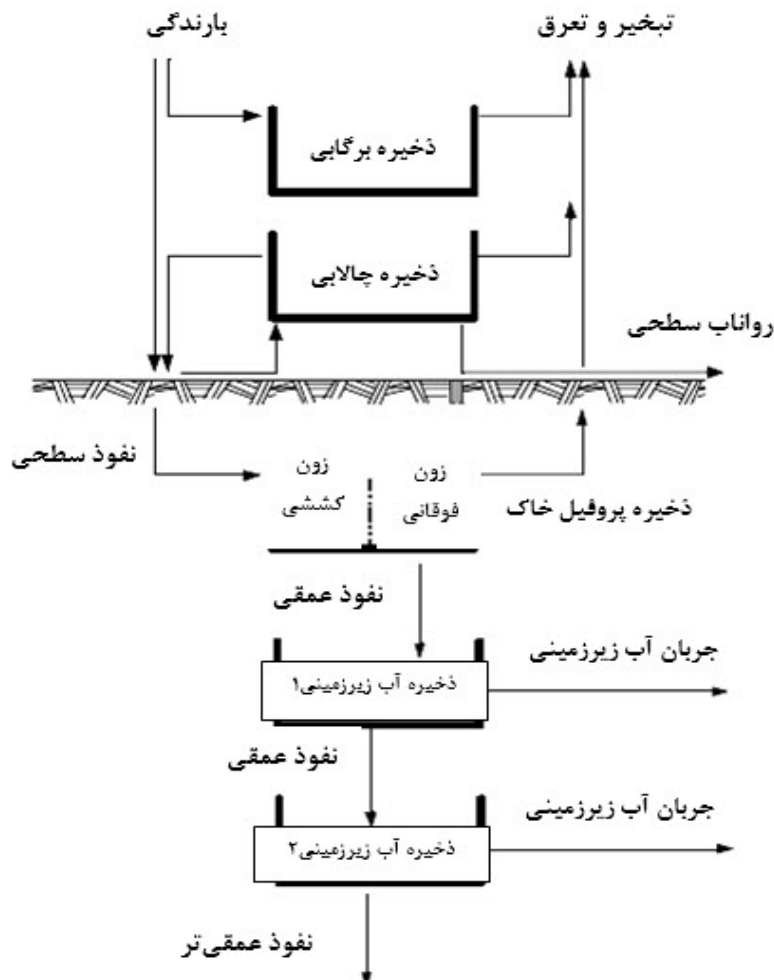
بر این اساس که مقیاس زمانی ماهانه در واسنجی مدل بارش-رواناب، دقیق‌تر از مقیاس‌های سالانه، نیم‌سالانه و فصلی عمل می‌کند (یوسفی و

<sup>11</sup> - Verification



SMA برخوردار هست. لازم به ذکر است که تمام روابط در سطح اعتماد 5% معنی‌دار هستند.

مقیاس‌های زمانی سالانه، نیم‌سالانه و فصلی، از عملکرد بهتر و بالاتری در صحت‌سنجی مدل HMS



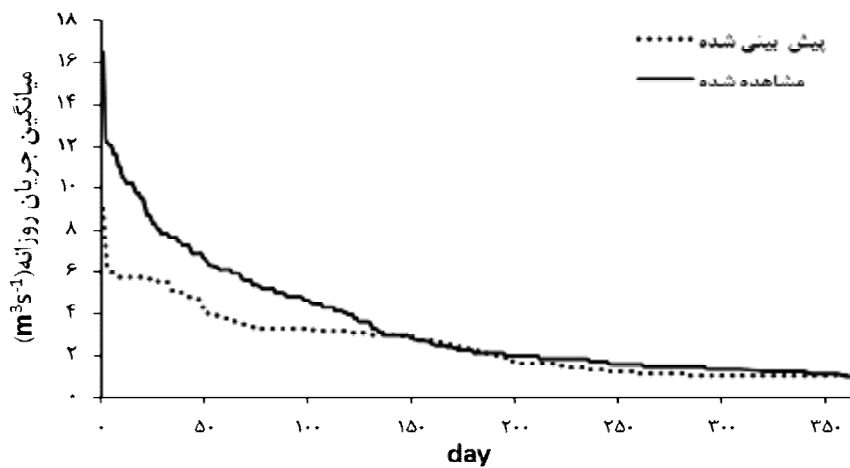
شکل 2- الگوریتم مدل پیوسته احتساب‌کننده رطوبت خاک (بنت 1998).

ماهانه و فصلی با هم برابر و یا اختلاف معنی‌داری باهم نداشتند. همچنین در نتایج تحقیق فلمینگ و نیری (2004) شبیه‌سازی بارش- رواناب درحالی‌که آن‌ها از مقیاس ماهانه برای شبیه‌سازی بارش-رواناب استفاده نکرده بودند، لذا در شبیه‌سازی بارش- رواناب به کمک مدل SMA HMS، استفاده از مقیاس زمانی ماهانه می‌تواند در شبیه‌سازی فرایند بارش-

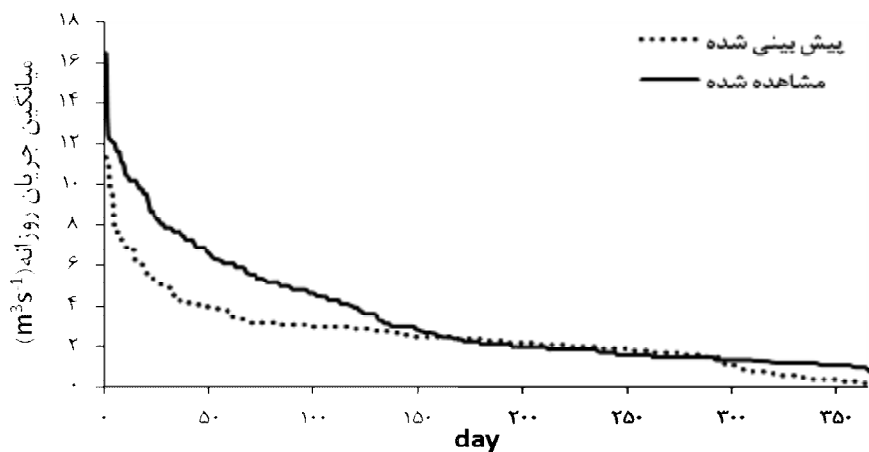
نتایج این تحقیق با یافته‌های گارسیا و همکاران (2008) که از سه مقیاس فصلی، ماهانه و روزانه برای شبیه‌سازی بارش- رواناب استفاده نمودند همخوانی داشت زیرا که در نتایج گارسیا و همکاران (2008) در برخی از زیرحوضه‌ها مقیاس ماهانه به دلیل داشتن ضریب تعیین بیشتر، بهتر از مقیاس فصلی و در برخی دیگر از زیرحوضه‌ها ضریب تعیین دو مقیاس

مقیاس 12 ماهه و 24 ماهه می‌تواند شبیه‌سازی را انجام دهد درحالی‌که آن‌ها از روش SMA و از مقیاس ماهانه در شبیه‌سازی بارش - رواناب استفاده نکرده‌اند.

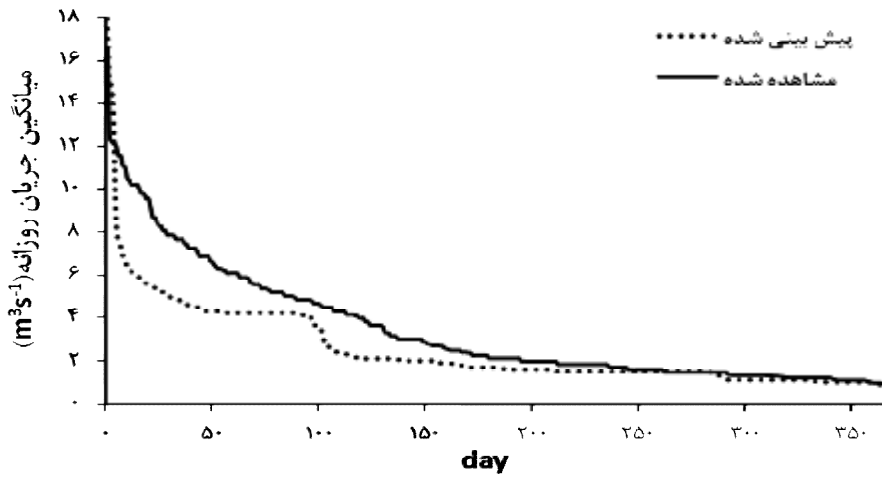
رواناب و پیش‌بینی دبی اوج بسیار مؤثر باشد. در نتایج تحقیق لیو و هان (2010) در شبیه‌سازی بارش - رواناب که با سه روش منحنی تداوم جریان، تبدیل فوریه و تحلیل موجکی، انجام گرفت گویای این مطلب بود که در هر سه روش، مقیاس 6 ماهه بهتر از



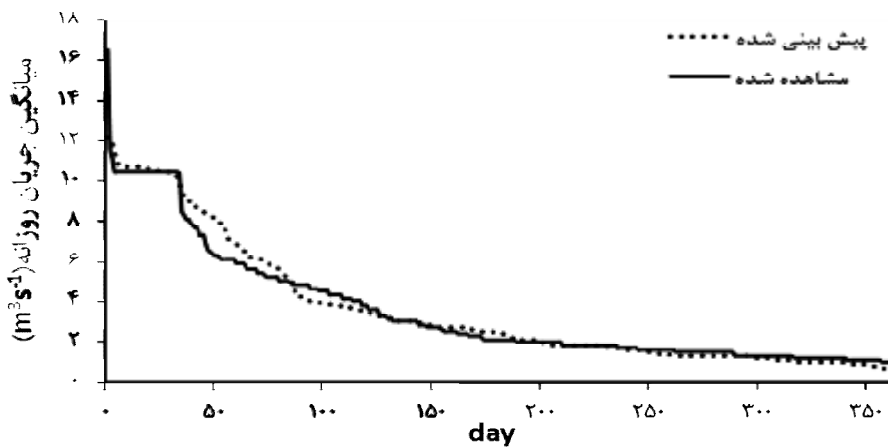
شکل 3- منحنی تداوم جریان زولاچای برای صحت‌سنجی مدل HMS SMA در مقیاس سالانه در سال آبی 87-88.



شکل 4- منحنی تداوم جریان زولاچای برای صحت‌سنجی مدل HMS SMA در مقیاس نیم‌سالانه در سال آبی 87-88.



شکل 5- منحنی تداوم جریان زولاچای برای صحت‌سنجی مدل HMS SMA در مقیاس فصلی در سال آبی 87-88.



شکل 6- منحنی تداوم جریان زولاچای برای صحت‌سنجی مدل HMS SMA در مقیاس ماهانه در سال آبی 87-88.

جدول 2- کارایی صحت‌سنجی مدل HMS SMA.

دوره صحت‌سنجی	ماهانه	فصلی	نیم‌سالانه	سالانه
85-86				
ضریب تعیین	0/7	0/26	0/14	0/4
مجموع مربعات خطا	1/42	3/87	4/39	3/47
86-87				
ضریب تعیین	0/29	0/14	0/26	0/44
مجموع مربعات خطا	2/7	4/09	3/6	3/69
87-88				
ضریب تعیین	0/68	0/42	0/34	0/39
مجموع مربعات خطا	1/56	2/62	2/85	2/69

**نتیجه‌گیری کلی**

در این تحقیق کارآیی روش منحنی تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل احتساب‌کننده رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی مختلف را مورد ارزیابی قرار گرفت. با وجود تنها ایستگاه در خروجی حوضه آبخیز زولاچای و کمبود داده‌ها، نتایج این تحقیق بر استفاده از روش منحنی تداوم جریان در صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی (HMS SMA) در مواردی که با کمبود داده مواجه است، صحت گذاشته شد. مدل‌های زیادی قابلیت شبیه‌سازی بارش - رواناب را دارند، ولی تعیین بهترین مدل بارش - رواناب با مقیاس زمانی صحیح، نقش بسیار مؤثری در شبیه‌سازی بارش - رواناب ایفا می‌کند چون با دقت بیشتری می‌تواند وقوع سیل را پیش‌بینی و دبی اوج را تخمین بزند. با توجه به سابقه تحقیق مقیاس زمانی ماهانه در واسنجی مدل HMS SMA، دقیق‌تر از مقیاس‌های زمانی سالانه، نیم‌سالانه و فصلی عمل می‌کند، لذا رسم منحنی‌های تداوم

جریان در صحت‌سنجی مدل مربوطه در مقیاس‌های زمانی مختلف این مطلب را تأیید کرد که پیش‌بینی‌های صحیح و مناسبی در جهت شبیه‌سازی مدل بارش - رواناب صورت گرفته است، به طوری که بررسی منحنی‌های تداوم جریان در 3 سال آبی (سال‌های آبی 85 تا 88) بیانگر این نتیجه است که مقیاس زمانی ماهانه، دقیق‌تر از مقیاس زمانی سالانه، نیم‌سالانه و فصلی عمل می‌کند و بیش از 75 درصد مواقع دبی‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده برهم منطبق شده‌اند. همچنین این نتایج حاکی از آن است که واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل HMS SMA به‌درستی انجام شده و منحنی تداوم جریان در مقیاس زمانی ماهانه با داشتن بیشترین ضریب تعیین و کمترین مجموع مربعات خطا، کارآیی بیشتری نسبت به مقیاس‌های زمانی دیگر در صحت‌سنجی مدل بارش - رواناب دارد.

**منابع مورد استفاده**

- جهانگیر، ر.، رائینی م و ضیاء احمدی م، 1387. شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسه با مدل HEC-HMS در حوضه معرف کارده. مجله آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره 22. صفحه‌های 13 تا 20.
- خرم مرگاو، ف.، فضل اولی ر و رائینی سرجاز م، 1387. کاربرد سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در استخراج خصوصیات فیزیوگرافی حوزه آبریز. (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز محدوده شهرستان گلوگاه). سومین کنفرانس مدیریت منابع آب. 5 تا 7 اردیبهشت. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه تبریز.
- دستورانی م، خداپرست ر، طالبی ع، وفاه خواه م، و دشتی ج، 1389. ارزیابی و واسنجی پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS در حوضه آبخیز سد طرق مشهد. مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، 10 تا 12 اردیبهشت، دانشگاه تربیت مدرس.
- رضاییان‌زاده مهدی، 1388. شبیه‌سازی هیدرولوژی حوزه آبریز خسرو شیرین از زیر حوزه‌های حوضه آبریز سد ملاصدرا با استفاده از مدل استانفورد - چهار (SWM-IV)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.
- عرب خدری م، 1377. ضرورت تجدید نظر در روش متداول برآورد بار معلق رودخانه‌ها. پنجمین سمینار مهندسی رودخانه، 28 تا 30 بهمن. دانشکده شهید چمران اهواز.
- غلامی و. بشیر گنبد م، عضدی م و جوکار سرهنگی ع، 1390. تأثیر فعالیت‌های بشر در تشدید ایجاد رواناب و خطر سیلاب حوضه آبخیز کسلیان. مجله علمی - پژوهشی علوم کشاورزی، جلد 6، صفحه‌های 20-28.

- موسی‌نژاد ن، جلال کمالی ن و جلال کمالی ا، 1390. مدل‌سازی بارش - رواناب حوضه آبریز هلیل رود با استفاده از مدل HMS SMA و مقایسه آن با شبکه عصبی - فازی تطبیقی بر مبنای خوشه‌بندی کاهشی. یازدهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. 15 تا 17 اسفند، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- میرمهدی م، 1388. پیش‌بینی سیل‌خیزی حوضه‌های آبریز مارون بر مبنای داده بارندگی بالادست حوضه با استفاده از مدل‌های ریاضی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه.
- یوسفی مبرهن ا، عبقری ه و عرفانیان م، 1392. بررسی واسنجی مدل هیدرولوژیکی احتساب‌کننده رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی متفاوت برای شبیه‌سازی بارش - رواناب. نشریه پژوهش و سازندگی، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی) شماره 102، صفحه‌های 120 تا 128.
- Alcazar J, and Palau A, 2010. Mediterranean watershed based on a regional classification. *Journal of Hydrology* 388: 41-51.
- Anonymous, 2012. HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension Reference Manual. US Army Corps of Engineers (USACE), Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Anonymous, 2012. HEC-HMS, Technical Reference Manual US Army Corps of Engineers (USACE). Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Bennett T, 1998. Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). MSc thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, California.
- Bennett T, and Peters JC, 2000. Continuous soil moisture accounting in the hydrologic engineering center hydrologic modeling system (HEC-HMS). Pp. 254-264. Proceedings of the Joint Conference on Water Resources Engineering and the Water Resources Planning and Management, Hyatt Regency Minneapolis, ASCE.
- Castellarin A, Vogel, RM and Brath A, 2004. A stochastic index flow model of flow duration curves. *Water Resources Research* 6: 344-453.
- Dawdy DR and O'Donnell T, 1965. Mathematical model of catchment behavior. *ASCE Hydraulic Div* (91, No, 4): 123-137.
- Shaeri Karimi S, Yasi M and Eslamian S, 2012. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach. *International Journal of Environmental Science and Technology* 9: 549-558.
- Fleming M and Neary M, 2004. Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering* 9(3): 172-186.
- García A, Sainz A and Revillaa JA, Álvarez C, Juanesa JA and Puentea A, 2008. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. *Journal of Hydrology* 356 (3-4): 312-326.
- James LD and Burges S J, 1982. Selection, calibration, and testing of hydrologic models, in hydrologic modeling of Small watersheds. Edited by CT Haan, HP Johnson, DL Brakensiek, and American Society of Agricultural Engineers. Monograph 5: 437-472.
- Linsley RK, Kohler MA and Paulhus JH, 1958. *Hydrology for Engineers*, McGraw-Hill, New York.
- Liu J and Han D, 2010. Indices for calibration data selection of the rainfall-runoff model. *Water Resources Research* 26: 451-550.
- Mimikou M and Kaemaki S, 1985. Regionalization of flow duration characteristics. *Journal of Hydrology* 82: 77-91.
- Norman LM, Huth H, Levick I, Shea Burns D, Phillip Guertin, F. Lara-Valencia and Semmens D, 2010. Flood hazard awareness and hydrologic modelling at Ambos Nogales. United States Mexico border. *Flood Risk Management* 89: 22-31.
- Rezaeian Zadeh M, Singh V P and Abghari H, 2010. Capability of HMS SMA Model and artificial neural networks for continuous hydrologic modeling for data scarce watersheds. ASCE International Conference. Jan 5-7, 2010, Chennai, India.
- Smakhtin VU, 2001. Low-flow hydrology: a review. *Journal of hydrology* 240: 147-186.
- Zinanlo A, 2003. Low flow and duration curve analysis aiming at predicting runoff from ungauged catchments. Master of Science Thesis, International Institute for Geo Information Science and Earth Observation Enscheda, the Netherlands, 94p.