

بررسی اثر خصوصیات مکانی حوزه آبخیز بر واسنجی وقایع تک رخدادی سیلاب (مطالعه موردی:

حوضه آبخیز کوه سوخته)

سودابه بهیان مطلق- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

مهدی پژوهش^۱- استادیار آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

خدایار عبدالهی- استادیار آبخیزداری، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲۴ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱۲/۲۵

چکیده

استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی یکی از روش‌های رایج در تجزیه و تحلیل کمی حوضه‌های آبخیز است. پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌سازی‌های بارش^۰ رواناب که انعطاف بیشتری در حل مسائل و پدیده‌های هیدرولوژیکی دارند، آن‌ها را جایگزین مناسبی به جای روابط تجربی کرده است. به‌طور مرسوم در پژوهش‌های صورت گرفته پیشین مبتنی بر بهینه‌سازی مدل در همان مقیاس محلی مورد بررسی قرار گرفته که فاقد عمومیت مکانی است. هدف این مطالعه ارائه پارامترهایی با اندازه معین است تا در سطح عمومی‌تری برای تمام زیرحوضه‌ها پاسخ قابل قبولی را ارائه دهد. بدین منظور پارامترهایی از مدل هیدروگراف سیلاب که در هیدروگراف سیلاب نقش دارند، در مقیاس زیرحوضه‌ای و بزرگ‌مقیاس مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مطالعه از مدل HEC-HMS برای مدل‌سازی رواناب زیر حوضه‌ها و میزان رواناب خروجی از حوضه استفاده شده است؛ برای ساختار مدل از عوامل شماره منحنی SCS برای روش تلفات و هیدروگراف واحد SCS جهت روش انتقال استفاده شد. به‌منظور واسنجی ابتدا بهینه‌سازی پارامترها در هریک از زیرحوضه‌ها به صورت جداگانه انجام گرفت و سپس مقدار عمومی پارامترها با به دست آوردن اندازه ثابتی از پارامترهای حساس که در همه زیرحوضه‌ها پاسخ قابل قبولی ارائه دهند، انجام شد. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که گرچه کارایی مدل در واسنجی با پارامترهای محلی برتر از واسنجی با استفاده از پارامترهای بزرگ‌مقیاس است، ولی ایستایی پارامترهای عمومی بهتر است. به‌منظور ارزیابی کارایی مدل از شاخص Nash-sutcliffe استفاده گردید که این شاخص برای کالیبراسیون محلی ۰/۸۵ و کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس ۰/۶۵ به دست آمد که در دامنه مطلوبی برای شبیه‌سازی قرار دارد.

کلیدواژه‌ها: مقیاس محلی، بزرگ‌مقیاس، مدل هیدرولوژیکی، HEC-HMS SCS.

۱. مقدمه

یکی از روش‌های رایج کمی در تجزیه و تحلیل حوضه‌های آبخیز بهره‌گیری از مدل‌های هیدرولوژیکی است. دسته‌ای از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب با ادغام داده‌های سری زمانی، پارامترهای مؤثر، متغیرهای منطقه و قوانین فیزیکی در داخل سیستم حوضه آبخیز، شبیه‌سازی میزان رواناب و فرآیندهای دیگر را امکان‌پذیر می‌سازد. هیدروگراف سیلاب نمایشی گرافیکی و مهم در تحلیل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد. پاسخ‌دهی حوضه در شکل هیدروگراف با مدیریت ارتباط مستقیم دارد. در واقع، مدیریت حوضه آبخیز میسر نخواهد بود مگر اینکه خصوصیات هیدرولوژیک حوضه برای درک سیستم پیش‌بینی شود (بهادرا و همکاران، ۲۰۰۸: ۱۰۱۸).

مدل‌های هیدرولوژیکی متنوعی برای نیازهای مختلف ارائه شده‌اند. مدل‌هایی از قبیل مدل آبخیزداری دانشگاه کلمبیا (UBCWM^۱) (لوکاس و وازیلیادس، ۲۰۱۴) و مدل ارزیابی آب‌وخاک (SWAT^۲) (سرویس پژوهش کشاورزی ایالات متحده، ۱۹۹۰)، هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی (GIUH^۳) به صورت جهانی در حوضه‌های فاقد آمار استفاده می‌شود (ابراهیم باتیش و احمد، ۲۰۱۶: ۱۳). این قبیل مدل‌ها برای شبیه‌سازی فرآیند بارش رواناب بیش از ۴ دهه اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما ارائه رواناب برای حوضه‌های فاقد آمار هنوز برای هیدرولوژیست‌ها به عنوان یک چالش باقی مانده است (واسوا، ۲۰۱۳: ۳۰). همین امر منجر به تنوع در مدل‌ها شده است.

مدل HEC-HMS^۴ یکی از مدل‌های شبیه‌سازی فرآیند بارش رواناب است. مدل HEC-HMS توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا ارائه شده است که از قابلیت‌های مهم آن امکان ارتباط با دیگر نرم‌افزارها از جمله سیستم اطلاعات جغرافیایی است. الحاقیه HEC-GEO HMS بسیاری از داده‌های مورد نیاز را که نیاز به محاسبه دستی دارند، اتوماتیک محاسبه می‌کند. مدل به صورت کاربر پسندی، حوضه را با آیکون‌های مسیرها و اتصال‌ها و... موجود در محیط HEC-HMS برای ورود به مدل آماده می‌کند. این مدل هم قابلیت اجرا به صورت یکپارچه و هم به صورت توزیعی دارد. کابرال موریرا (۲۰۱۳: ۱۶۴) به منظور مدل‌سازی رواناب در حوضه رودخانه گرانجریو، از مدل نیمه توزیعی HEC-HMS برای به دست آوردن پارامترهای مورد نیاز استفاده کرد و مدل حاصل را مدل BHG^۵ نامید.

1 University of British Columbia Watershed Model

2 Soil and Soil Water Assessment Tool

3 Agricultural Research Service

4 Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph

5 Ibrahim-Bathisand Ahmed

6 Vassova

7 Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System

8 bacia hidrográfica do rio Granjeiro

همچنین آگراوال (۲۰۰۵: ۱۷۶) به منظور ارائه مدلی برای ورود داده‌ها به HEC-HMS از مدل توزیعی استفاده کرد و مدل حاصل را^۱ Per-Pro2004 نامید.

از نکات این مدل امکان تغییر ساختار سیستم مدل سازی توسط کاربر است. در مدل HEC-HMS برای محاسبه روش تلفات، انتقال و روندیابی جریان روابط مختلفی وجود دارد که هر رابطه پارامترهای خاص خود را دارد که با استفاده از روابط تجربی محاسبه می شود. این مدل می تواند در مناطق فاقد آمار و در مناطقی که نظارت روی داده‌ها محدود است میزان رواناب را برآورد کند (ابراهیم باتیش و احمد، ۲۰۱۶: ۱۱).

دقت برآورد رواناب با مدل های هیدرولوژیکی به دقت برآورد پارامترهای مدل و متغیرهای مکانی و زمانی بستگی دارد (کارابوا^۲ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۵۹؛ لو^۳ و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۱۰؛ بویج^۴، ۲۰۰۳: ۲۵۹۱). در واقع می توان گفت میزان موفقیت در تعیین دقت شبیه سازی وابسته به دقت پارامترهای ورودی و شناخت کاربر از ساختار مدل است (زانگ^۵، ۲۰۱۳: ۶۵؛ بورمن^۶، ۲۰۰۶: ۱۷۴؛ باتس^۷، ۲۰۰۴: ۲۶۰). راه حل بهینه این است که کالیبره کردن داده های بارش با توجه به تغییرات زمانی و مکانی باشد. به دلیل نقش کلیدی بارش اندازه گیری های باران سنجی خوب در نقاط بارش و استفاده از اطلاعات مکانی رادار برای بهبود ارزیابی مکانی بارش امکان پذیر است (اسلازینکا و زاویسلاک^۸، ۲۰۰۵، ۲۰۳؛ باردوسی و داس^۹، ۲۰۰۸: ۸۵؛ بندینت^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۳: فصل اول).

HEC-HMS مدل بارش^{۱۱} روانابی است که پارامترهای یکپارچه و همچنین پارامترهای توزیعی را پشتیبانی می کند (آهن^{۱۱}، ۲۰۰۷: ۱۷۹). در مدل یکپارچه پارامترهای هیدرولوژی به صورت متوسط بیان می شوند و تغییرات مکانی آنها مد نظر نیست. یک مدل توزیعی به زیر حوضه هایی تقسیم می شود و پارامترهای هیدرولوژیکی برای هر واحد به طور مجزا تحلیل می شود.

در تحقیقی که اسدی و بوستانی (۲۰۱۳: ۱۱۹) به منظور بررسی عملکرد مدل HEC-HMS انجام دادند. از مدل یکپارچه و مدل توزیعی استفاده کردند. همان طور که به صورت عمومی انتظار می رفت نتایج نشان داد که مقدار دبی اوج و حجم رواناب در مدل توزیعی عملکرد بهتری نسبت به مدل یکپارچه نشان داده است.

1 Pre-and-Post Processor for HEC-HMS, 2004

2 Karabowa

3 Lu

4 Boojj

5 Zhang

6 Bormann

7 Butts

8 Szalinskaand Zawislak

9 Bardossy and Das

10 Bendient

11 Ahn

یکی از قابلیت‌های مدل‌هایی نظیر HEC-HMS بررسی اثرات تغییرهاست، برخی تغییرات مکانی و برخی زمانی هستند. امروزه به دلیل افزایش جمعیت، تغییر کاربری اراضی با پوشش طبیعی به مناطق شهری به صورت قابل توجهی افزایش یافته بنابراین ایجاد این تغییرات و به دنبال آن کاهش پوشش گیاهی و تبخیر و تعرق در اندازه رواناب حاصل از بارش نیز تأثیر گذاشته است (باگز و سان، ۲۰۱۱؛ ۲۶۱؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۶: ۱۱). تغییر کاربری اراضی یا تغییر پوشش به دلیل نرخ بالای جنگل‌زدایی و گسترش کشاورزی با شد در دبی اوج و حجم رواناب تأثیر بسزایی دارد (اولانگ و فورست، ۲۰۱۱: ۸۶). در این ارتباط مراد نژادی و همکاران (۱۳۹۴: ۳۵) در رابطه با الویت بندی زیر حوضه‌های مناسب بهره‌برداری جنگل با استفاده از مدل HEC-HMS به مطالعه پرداختند. مکان‌یابی مناطق مناسب جهت اجرای عملیات بهره‌برداری نشان داد به ترتیب زیر در چه الویتی قرار دارند.

ساختار منعطف مدل HEC-HMS امکان بررسی سناریوها را فراهم می‌کند. والتر داک (۲۰۱۴: ۱۸۹) لزوم کاهش دبی اوج رواناب و جاری شدن سیل در بالادست رودخانه سد را در به کار بردن ترکیبی از پروژه‌های افزایش نفوذ یا ذخیره رواناب اضافی دانست که با استفاده از مدل توزیعی HEC-HMS این مطالعه صورت پذیرفت. وی نشان داد، طرح‌های مکانیکی و بیولوژیکی در تغییر حجم رواناب و زمان تا اوج دبی تأثیر بسزایی دارد. طبق پژوهش‌های صورت گرفته با افزایش کمیت این طرح‌ها زمان تا اوج دبی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (الکساندر، ۲۰۰۹: ۱۱۸).

سلیمانی و همکاران (۱۳۸۷: ۵۸) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل HEC-HMS به شناسایی مناطق سیل‌خیز پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میزان مشارکت حوزه‌ها در سیل خروجی متناسب با دبی اوج نبوده و لزوماً زیر حوزه‌هایی که دبی بیشتری دارند بیشترین مشارکت را در سیل خروجی حوضه ندارند. در این قبیل مطالعات لازم است پارامترهای مدل به‌طور عمومی^۴ بهینه شده باشند. به عبارت دیگر، به منظور دریافت پاسخ مناسب از مدل هیدرولوژیکی پارامترها باید به صورت چند معیاره کالیبره شوند. مدل‌ها برای مناطقی با شرایط متفاوت با شرایط آب‌وهوایی و فیزیوگرافی متفاوت ارائه شده‌اند به همین دلیل باید ابتدا کالیبره شوند؛ اما اگر کالیبراسیون به صورت عمومی صورت نگیرد چه اتفاقی می‌افتد. هدف اول این تحقیق پاسخ علمی به این سؤال است.

اکثر تحقیقات صورت گرفته در زمینه کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی با پارامترهای محلی است ولی اگر پارامترها در مقیاس‌های بزرگ‌تر کالیبره شوند (تروی^۵ و همکاران، ۲۰۰۸: ۸؛ پوخرل و گوپتا، ۲۰۱۰: ۱۲؛

1 Boggsand Sun

2 Olangand Furst

3 Alexander

4 Global

5 Troy

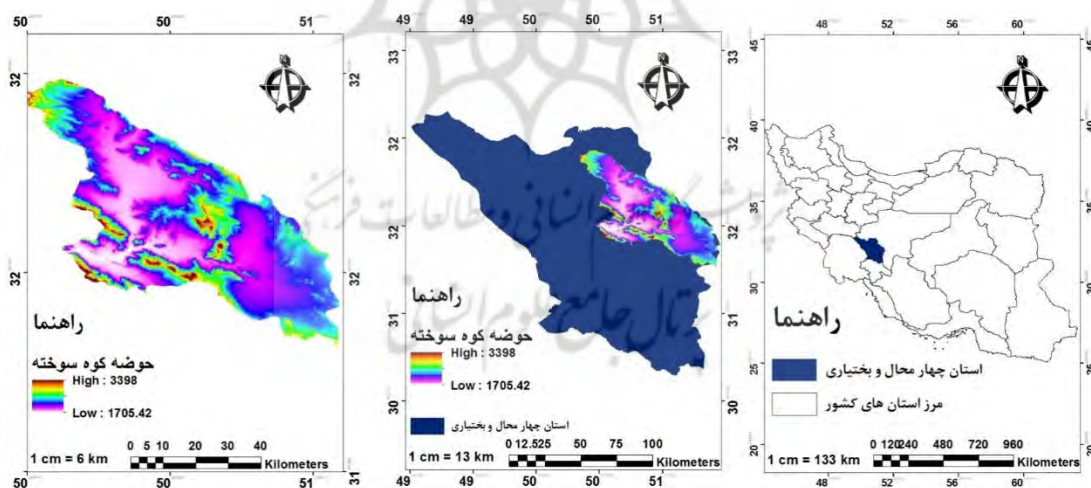
6 Pokhrel and Gupta

بلوسچل^۱، ۲۰۰۱: ۷۱۰؛ عبدالله و لتنمایر، ۱۹۹۷: ۲۵۳) می‌توان نتایج را به مناطق فاقد آمار تعمیم داد. برخی محققان در این زمینه تحقیقاتی انجام داده‌اند از قبیل سامانیگو (۲۰۱۰: ۲۰) پوخرل (۲۰۰۸: ۱۱) به این طریق که پس از مشخص کردن پارامترهای حساس، پارامترها به صورت منطقه‌ای کالیبره می‌شوند (هانداجا و باردوسی، ۲۰۰۴: ۲۹۳؛ پاراجکا و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۶۸؛ بون^۳، ۲۰۰۱: ۹) و براساس پارامترهای محلی، پارامترهای بزرگ‌مقیاس را به دست آورده و کالیبره شوند. هدف از این مطالعه مقایسه واسنجی محلی و بزرگ‌مقیاس است. با توجه به اینکه در ایران کمتر به این موضوع اهمیت داده شده می‌توان نقطه قوت این تحقیق دانست و نتایج این مطالعه را به مناطق فاقد آمار تعمیم داد.

۲. مواد و روش‌ها

مشخصات حوزه مورد مطالعه

این مطالعه در حوزه آبخیز کوه سوخته که بخشی از حوزه آبخیز بهشت‌آباد است، انجام شده است. بخش‌هایی از شهرستان‌های شهرکرد، بروجن و کیار در این محدوده قرار می‌گیرد. از نظر جغرافیایی بین ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه طول جغرافیایی شرقی تا ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه و ۳۲ درجه عرض جغرافیایی شمالی واقع شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه ۲۷۸۳ کیلومتر مربع، کمترین ارتفاع در منطقه ۱۷۰۵ متر و بیشترین ارتفاع ۳۳۹۸ متر و متوسط شیب منطقه ۱۹٪ است. همچنین میانگین بارش سالیانه در ایستگاه سینوپتیک شهرکرد ۳۲۰ میلی‌متر است.



تصویر ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

- 1 Bloschl
- 2 Hundedhaand Bárdossy
- 3 Beven

روش تحقیق

در مرحله اولیه آماده سازی داده‌ها با استفاده از الحاقیه HEC-GEOHMS بر اساس مدل رقومی ارتفاع (DEM) و گذراندن مراحل متفاوت، مشخصات فیزیکی حوضه تهیه و به مدل HEC-HMS معرفی شد. در این مطالعه از خصوصیات فیزیکی و دینامیکی حوضه استفاده گردید. پارامترهای مدل به صورت محلی و همچنین با در نظر گرفتن مقدار ثابت برای هر زیر حوضه در حالت بزرگ‌مقیاس، کالیبره شدند. پارامترهای مربوط به روش تلفات، روش انتقال و روند یابی جریان محاسبه و وارد مدل گردید. در مدل هواشناسی و مدل کنترل سازوکارهای لازم برای اجرای صورت گرفت در بخش سری‌های زمانی این مدل داده‌های بارش ۶ ساعته و دبی ۶ ساعته استفاده شده است. انتخاب داده‌های ۶ ساعته به این دلیل بود که مطابق با رابطه تجربی اشنایدر (مدت زمان بارش) زمان بارش باید مساوی یا بیش از زمان هیدروگراف واحد باشد و به دلیل در دسترس نبودن داده‌های یک ساعته بارش، از داده‌های ۶ ساعته استفاده گردید. به منظور شناخت پارامترهای ح- ساس، تحلیل ح- ساسیت پارامترها انجام شد. سپس برای بررسی وضعیت کارایی مدل با حالات مختلف، ۶ رویداد برای واسنجی و دو رویداد برای صحت سنجی مدل انتخاب شد. روند مراحل محاسبه پارامترهای مدل HEC-HMS به شرح ذیل است:

مدل حوضه

در این قسمت به منظور محاسبه پارامترهای مورد نیاز در مدل تلفات و مدل انتقال در زیر حوضه‌ها به ترتیب از روش شماره منحنی SCS و هیدروگراف واحد SCS استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز مدل تلفات شامل نگهداشت اولیه، شماره منحنی و نفوذپذیری است و پارامتر مورد نیاز مدل انتقال زمان تأخیر است. با استفاده از روش برانسبای - ویلیامز زمان تأخیر محاسبه گردید (علیزاده، ۱۳۹۰: ۱۹۰).

$$T_c = \frac{0.96L^{1.2}}{H^{0.2} A^{0.1}} \quad (1)$$

$$T_{lag} = 0.6 T_c \quad (2)$$

که در این معادله، T_c زمان تمرکز برحسب ساعت، L طول آبراهه اصلی برحسب کیلومتر H اختلاف ارتفاع برحسب متر، A مساحت حوزه برحسب کیلومتر مربع، T_{lag} زمان تأخیر برحسب ساعت است. به صورت تئوری مقدار CN بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است اما در عمل بین ۳۰ تا ۱۰۰ می‌باشد. در CN برابر صفر روانابی از بارندگی حاصل نیامده و در CN برابر ۱۰۰، تمامی بارش در سطح زمین جریان یافته و ارتفاع رواناب برابر ارتفاع بارندگی خواهد بود (مهدوی، ۱۳۸۶: ۱۴۰). با استفاده از نقشه شماره منحنی که نشان‌دهنده خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری است، عدد مربوط به هر زیر حوضه با استفاده از میانگین وزنی محاسبه شد.

S حداکثر توان نگهداشت مربوط به نفوذ در خاک و ذخیره سطحی است. مقدار S در رابطه با نوع پوشش و نحوه بهره‌برداری از اراضی و وضعیت سطح خاک از نظر نفوذپذیری و داخل خاک از نظر انتقال است. چنانچه ارتفاع بارندگی کمتر از $0.2S$ باشد فرض می‌شود که رواناب به وجود نخواهد آمد؛ بنابراین I_a را به‌عنوان نگهداشت اولیه در نظر گرفته می‌شود (مهدوی، ۱۳۸۶: ۱۴۸).

$$I_a = 0.2S \quad (۳)$$

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (۴)$$

در رابطه فوق I_a نگهداشت اولیه، S نگهداشت کل، CN شماره منحنی است. در مدل HEC-GEO-HMS بعد از ایجاد مدل هوا شناسی باید روش ارائه بارش مشخص شود که اینجا به دلیل موجود بودن هایتوگراف در این مدل هیتوگراف مشخص شده توسط کاربر انتخاب گردید.

تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترها، دو پارامتر نگهداشت اولیه و زمان تأخیر را در نظر گرفتیم. بدین منظور مقدار این دو پارامتر از -20% تا $+20\%$ با فواصل 10% تغییر داده شد و اثر آن بر دبی اوج سیل اعمال گردید. حساسیت مدل نسبت به پارامترها با فرمول زیر محاسبه گردید (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰: ۳۳):

$$SEN = 100 \frac{New - Old}{Old \cdot |PC|} \quad (۵)$$

در رابطه فوق SEN مقدار حساسیت تابع هدف حاصل از تغییر در اندازه پارامتر، New مقدار جدید خروجی مدل حاصل از پارامتر جدید، Old خروجی اولیه مدل، PC قدر مطلق درصد تغییر است.

واسنجی

با توجه به اینکه دقت پارامترهای ورودی شاخصی برای میزان کارایی مدل‌سازی است و نتایج شبیه‌سازی نهایی مدل به این مرحله وابسته است، بعد از تعیین حساسیت مدل نسبت به پارامترها، پارامتر حساس انتخاب گردید و پارامترها به صورت محلی و بزرگ‌مقیاس کالیبره شد. در این پژوهش از پارامترهای نگهداشت اولیه، نفوذناپذیری و زمان تأخیر و همچنین رویداد بارش برای واسنجی مدل استفاده شد.

صحت‌سنجی

از آنجاکه نتایج حاصل از مدل در تصمیم‌گیری‌ها و طراحی منابع آب‌و‌خاک و همچنین مسائل مربوط به سیل و امثال آن کاربرد فراوانی دارد، همواره درجه اعتبار آن‌ها مورد سؤال است. با عدم قطعیت‌ها و خطاهای مدل‌ها از هیچ

مدل کامپیوتری نمی‌توان پیش‌بینی کامل و دقیقی را انتظار داشت. لذا آن‌ها را باید کالیبره و اعتبار سنجی نمود. صحت سنجی با یک سری اطلاعات جدید، مستقل از اطلاعات استفاده شده در مرحله واسنجی شبیه‌سازی جریان انجام شد که برای این پروژه صحت سنجی مدل از طریق اجرای مدل با پارامترهای بهینه شده برای دو رویداد بارش صورت گرفت.

ارزیابی کارایی مدل

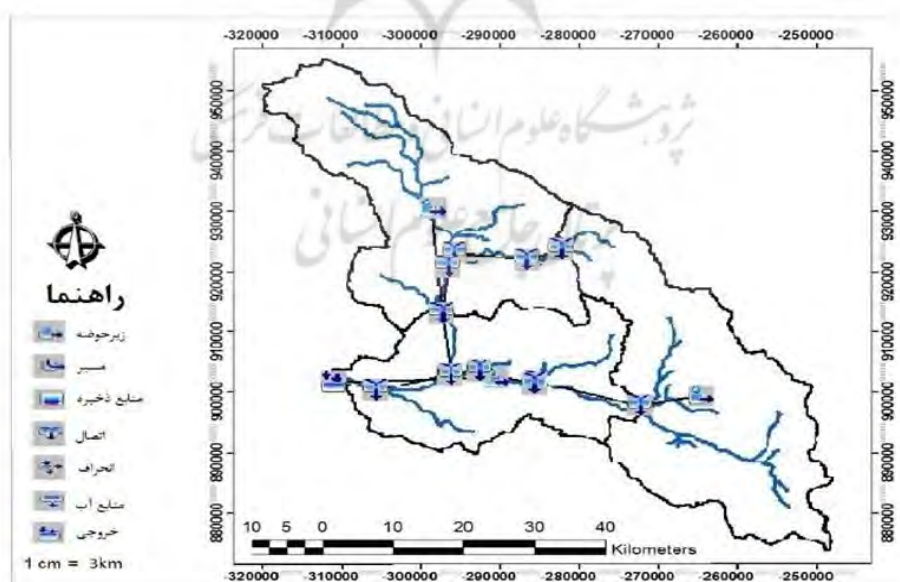
برای ارزیابی عملکرد از شاخص Nash-Sutcliffe به‌عنوان معیاری برای سنجش تفاوت میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است هرچه مقدار شاخص به یک نزدیک‌تر باشد داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های مشاهده‌ای شباهت بیشتری دارند.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O^-)^2} \quad (6)$$

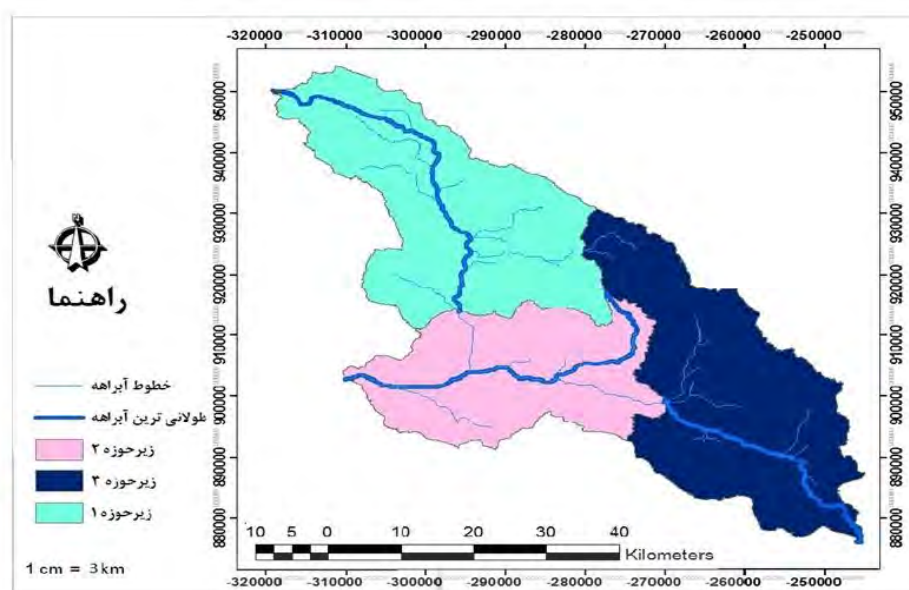
در روابط فوق NSE شاخص Nash-Sutcliffe، O_i داده‌های مشاهده‌ای، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده، O^- متوسط داده‌های مشاهده‌ای است.

۳. بحث و نتایج

نقشه مدل حوضه با استفاده از الحاقیه HEC-Geo-HMS حاصل گردید (تصویر ۲) و نقشه حاصله به‌عنوان اولین گام مدل‌سازی، وارد برنامه HEC-HMS گردید.

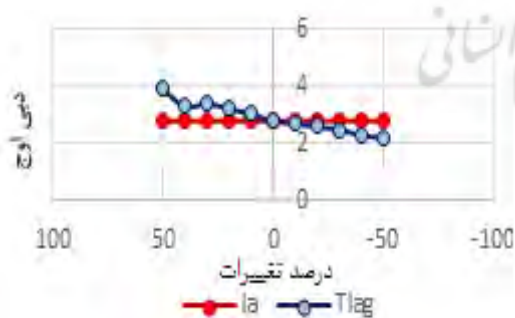


تصویر ۲. نقشه شماتیک حوضه کوه سوخته به‌منظور ورود به مدل HEC-HMS



تصویر ۳. زیرحوضه‌های حوزه کوه سوخته

تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل نشان می‌دهد که پارامتر نگهداشت اولیه و زمان تأخیر دارای حساسیت بالایی می‌باشد؛ در صورتی که سایر پارامترها حساسیت کمتری نسبت به تغییر تابع هدف در مدل HEC-HMS دارند. با توجه اینکه هر چه شیب نمودار بیشتر باشد حساسیت مدل نسبت به پارامتر بیشتر است، در این حالت یک تغییر کوچک در پارامتر موردنظر باعث تغییرات زیادی در مدل می‌شود و بالعکس اگر شیب نمودار کم باشد تغییرات زیاد پارامتر اثر کمی روی پاسخ نهایی مدل خواهد داشت (تلوری، ۱۳۷۵: فصل اول). همان‌طور که در تصویر و (۴) و (۵) نشان داده شده مدل در هر دو حالت محلی و بزرگ‌مقیاس نسبت به پارامتر زمان تأخیر حساسیت بیشتری برای همه وقایع نشان می‌دهد.



تصویر ۵. تحلیل حساسیت پارامترها در کالیبراسیون

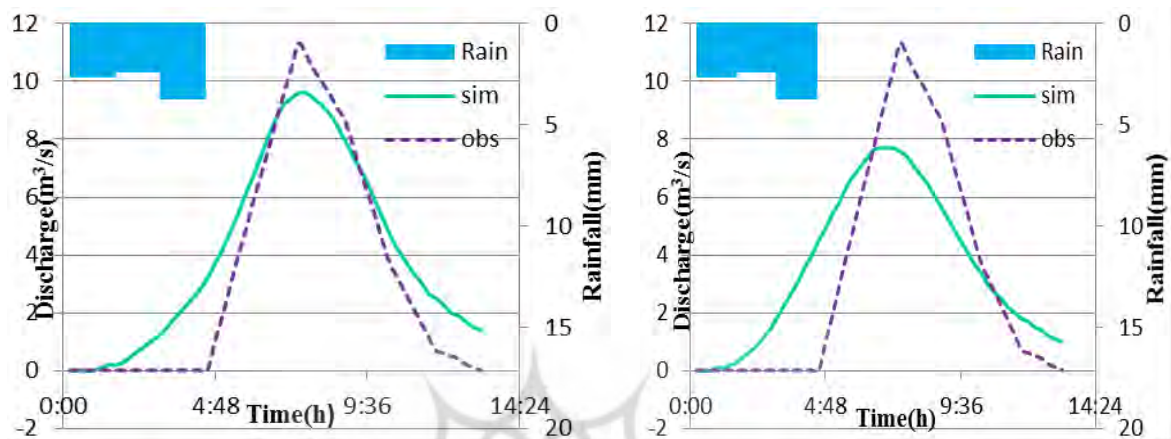
بزرگ‌مقیاس حوزه کوه سوخته، رویداد ۹۰/۰۵/۲۸



تصویر ۴. تحلیل حساسیت پارامترها در کالیبراسیون

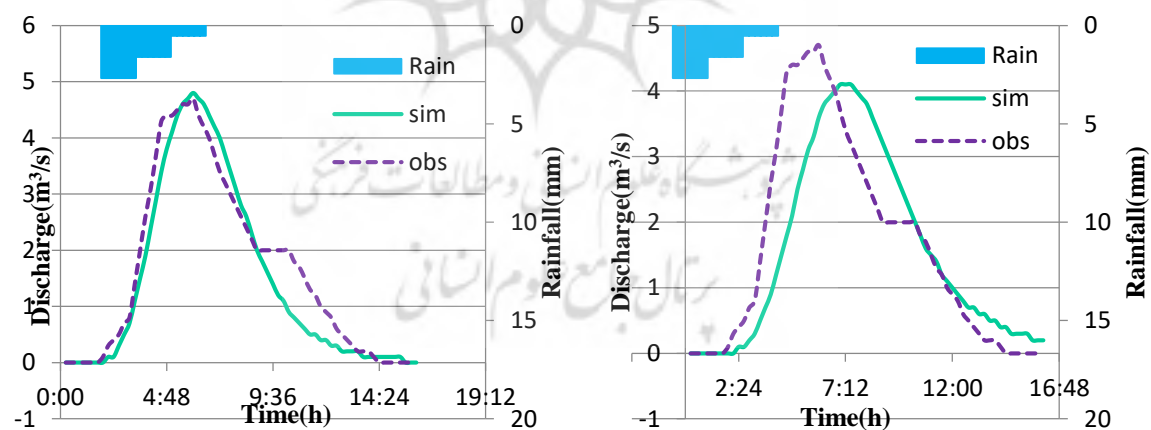
محلی حوزه کوه سوخته، رویداد ۹۰/۰۵/۲۸

تصاویر ذیل نشان‌دهنده دبی اوج مشاهده‌ای و دبی اوج شبیه‌سازی شده است. تصاویر (۶۸ و ۱۰) مربوط به مقایسه دبی اوج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای محلی است و همچنین تصاویر (۷،۹ و ۱۱) اختلاف بین دبی اوج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای بزرگ‌مقیاس را نشان می‌دهد.



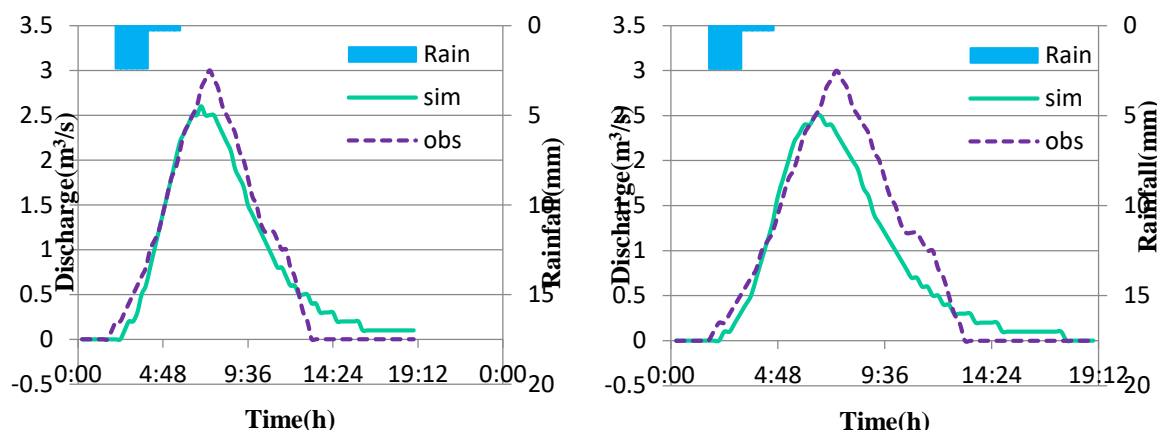
تصویر ۶. دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در رویداد ۹۰/۰۸/۲۹ در حوضه کوه سوخته-زیر حوضه (کالیبراسیون محلی)

تصویر ۷. دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در رویداد ۹۰/۰۸/۲۹ در حوضه کوه سوخته-زیر حوضه (کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس)



تصویر ۸. دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در رویداد ۹۱/۱۰/۰۱ در حوضه کوه سوخته-زیر حوضه (کالیبراسیون محلی)

تصویر ۹. دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در رویداد ۹۱/۱۰/۰۱ در حوضه کوه سوخته-زیر حوضه (کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس)



تصویر ۱۰. دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در رویداد ۹۱/۱۰/۰۵ در حوضه کوه سوخته-زیر حوضه (کالیبراسیون محلی) ۱

تصویر ۱۱. دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در رویداد ۹۱/۱۰/۰۵ در حوضه کوه سوخته-زیر حوضه (کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس) ۱

تصاویر فوق‌گویی برتری ظاهری کالیبراسیون محلی است. رویداد ۵ دی ۹۱ بیشترین دقت و رویداد ۱۱ فروردین ۹۱ کمترین دقت را در کالیبراسیون محلی داشتند. دلیل این اختلاف ممکن است در تغییر نفوذپذیری اراضی در فصل زمستان و بهار باشد. در کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس نیز در رویداد ۵ دی ۹۱ کارایی بالایی مشاهده می‌شود. در کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس بعد از انتخاب پارامترها در مرحله تحلیل حساسیت، پارامترهای زمان تأخیر، نگهداشت اولیه، نفوذناپذیری و شماره منحنی واسنجی گردید. نتایج حاصل از واسنجی مطابق جدول (۱) به دست آمد.

جدول ۱. پارامترهای بزرگ‌مقیاس واسنجی شده در حوضه آبخیز کوه سوخته

زیر حوضه	مساحت (km ²)	شماره منحنی (CN)	نگهداشت اولیه (mm)	نفوذناپذیری (%)	زمان تأخیر (min)
۱	۱۰۰۷/۵۳	۶۹	۵۰	۱/۲۵	۱۰۰۸/۵
۲	۷۴۱/۵۵	۵۸	۵۰	۲	۱۰۰۵/۷
۳	۱۰۳۳/۹۲	۶۶	۵۰	۱/۴	۹۶۱,۴۲

پارامترهای موردنیاز اجرای مدل مطابق با آنچه در قسمت مواد و روش‌ها ذکر شد محاسبه گردید. به‌منظور دقت بیشتر مدل در برآورد رواناب پارامترها مورد واسنجی به روش سعی و خطا قرار گرفتند. پارامترهای زمان تأخیر، نگهداشت اولیه، نفوذناپذیری و شماره منحنی مطابق اطلاعات جدول (۲) در ۶ رویداد حوزه به‌صورت محلی واسنجی گردیدند.

جدول ۲. پارامترهای محلی واسنجی شده HEC-HMS در حوضه آبخیز کوه سوخته

رویداد	زیر حوضه	مساحت (km ²)	نگهداشت اولیه (mm)	شماره منحنی (CN)	نفوذناپذیری (%)	زمان تأخیر (min)
۹۰/۰۸/۲۹	۱	۱۰۰۷/۵۳	۵۵	۶۹	۱/۹	۱۲۰۰
	۲	۷۴۱/۵۵	۵۰	۵۸	۲/۴	۱۱۵۰
	۳	۱۰۳۳/۹۲	۴۵	۶۶	۰/۹	۹۲۰
۹۰/۱۱/۱۲	۱	۱۰۰۷/۵۳	۵۳	۶۹	۱/۵	۱۱۰۰
	۲	۷۴۱/۵۵	۵۰	۵۸/۸	۲	۱۰۵۰
	۳	۱۰۳۳/۹۲	۵۲	۶۶	۱/۵	۹۸۰
۹۱/۰۱/۱۱	۱	۱۰۰۷/۵۳	۳۰	۶۹	۱/۲	۱۲۰۰
	۲	۷۴۱/۵۵	۳۰	۶۶	۱/۲	۱۳۵۰
	۳	۱۰۳۳/۹۲	۳۰	۵۸	۱/۹	۱۴۰۰
۹۱/۰۹/۲۱	۱	۱۰۰۷/۵۳	۵۰	۶۹	۰/۹	۱۰۰۰
	۲	۷۴۱/۵۵	۵۰	۵۸	۱	۹۰۰
	۳	۱۰۳۳/۹۲	۵۰	۶۶	۱	۱۰۰۰
۱۰۹۱/۰۱	۱	۱۰۰۷/۵۳	۳۰	۶۹	۱/۳	۶۶۰
	۲	۷۴۱/۵۵	۳۰	۵۸	۱/۸	۶۹۰
	۳	۱۰۳۳/۹۲	۳۰	۶۶	۱/۳	۶۹۰
۹۱/۱۰/۰۵	۱	۱۰۰۷/۵۳	۳۰	۶۹	۱/۸	۱۲۰۰
	۲	۷۴۱/۵۵	۳۰	۵۸/۸	۲/۸	۱۱۵۰
	۳	۱۰۳۳/۹۲	۳۰	۶۶	۱/۶	۱۱۰۰

نتایج حاصل از واسنجی در ۶ رویداد و حجم رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در حوضه آبخیز کوه سوخته مطابق با جدول (۳) مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۳. مقایسه نتایج واسنجی حجم رواناب به دو روش بزرگ‌مقیاس و محلی در مقابل مقادیر مشاهده‌ای

رویداد	زیرحوضه	شبیه‌سازی		مشاهده‌ای
		حجم (m ³)		حجم (m ³)
		واسنجی بزرگ‌مقیاس	واسنجی محلی	
۹۰/۰۸/۲۹	۱	۰/۶۱	۰/۸۱	۰/۶۵
	۲	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۶۵

ادامه جدول ۳

رویداد	زیرحوضه	شبیه‌سازی		مشاهده‌ای حجم (m ³)
		حجم (m ³)		
		واسنجی بزرگ‌مقیاس	واسنجی محلی	
	۳	۰/۷	۰/۸	۰/۶۵
۹۰/۱۱/۱۲	۱	۱/۵۶	۱/۲۵	۱/۱
	۲	۱/۲	۱/۲۸	۱/۱
	۳	۱/۵	۱/۳	۱/۱
۹۱/۰۱/۱۱	۱	۰/۳۷	۰/۲۵	۰/۳۳
	۲	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳۳
	۳	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۳۳
۹۱/۰۹/۲۱	۱	۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۴
	۲	۰/۶۳	۰/۳۱	۰/۴
	۳	۰/۶۲	۰/۴۴	۰/۴
۱۰۹۱/۰۱	۱	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۴
	۲	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۴
	۳	۰/۳۷	۰/۳۴	۰/۴
۹۱/۱۰/۰۵	۱	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۲۵
	۲	۰/۲۱	۰/۲۹	۰/۲۵
	۳	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۵

پس از واسنجی مدل در ۶ رویداد در حوزه، صحت سنجی انجام گرفت. دو رویداد به‌منظور صحت سنجی مدل انتخاب گردید. دبی رواناب و همچنین حجم رواناب برآورد گردید. در جدول (۳) مقادیر به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی و داده‌های مشاهده‌ای ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری جهت مقایسه ارائه شده است.

جدول ۴. ارزیابی کارایی مدل با استفاده از کالبراسیون محلی و بزرگ‌مقیاس حوضه کوه سوخته

مرحله	تاریخ	NSE
کالبراسیون محلی	۱۳۹۰/۰۸/۲۹	۰/۸
	۱۳۹۰/۱۱/۱۲	۰/۸۳
	۱۳۹۱/۰۱/۱۱	۰/۷۷
	۱۳۹۱/۰۹/۲۱	۰/۸۸
	۱۳۹۱/۱۰/۰۱	۰/۹۱
	۱۳۹۱/۱۰/۰۵	۰/۹۴

ادامه جدول ۴

مرحله	تاریخ	NSE
کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس	۱۳۹۰/۰۸/۲۹	۰/۷۱
	۱۳۹۰/۱۱/۱۲	۰/۸۴
	۱۳۹۱/۰۱/۱۱	۰/۵۳
	۱۳۹۱/۰۹/۲۱	۰/۳۳
	۱۳۹۱/۱۰/۰۱	۰/۶۳
	۱۳۹۱/۱۰/۰۵	۰/۸۴

نتایج حاصل از واسنجی و بهینه‌سازی نشان داد که برآورد دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف، مدل‌سازی با استفاده از کالیبراسیون محلی برتری ظاهری دارد (جدول ۳ و ۴) (تصاویر ۸، ۶ و ۱۰) هرچند این نتیجه برای کل حوضه عمومیت ندارد. همان‌طور که انتظار می‌رود از لحاظ ارتفاع رواناب کمترین اختلاف بین رواناب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مربوط به کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای محلی است (جدول ۳). در ارزیابی کارایی نتایج، شاخص Nash-Sutcliffe برای کالیبراسیون محلی ۰/۸۵ و کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس ۰/۶۵ به دست آمده که در دامنه مطلوبی برای شبیه‌سازی قرار دارد.

۴. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی از روش‌های غیرمستقیم است که سرعت بیشتری نسبت به روش‌های میدانی دارد. برای دستیابی به نتایج دقیق در مدل‌سازی نیاز به برآورد قابل قبول پارامترهای مدل و نیز اطلاع از متغیرهای زمانی و مکانی است. به این فرآیند کالیبراسیون اطلاق می‌شود. نتایج حاصل از مدل‌سازی بارش-رواناب توسط مدل HEC-HMS در حوزه مورد مطالعه، گویای این مطلب است که استفاده از کالیبراسیون محلی نسبت به کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس دقت ظاهری بیشتری دارد و این موضوع مطابق با تحقیقات سامانیگو و همکاران (۲۰۱۰: ۲۲) و هاندچا و باردوسی (۲۰۰۴: ۲۹۳) است؛ اما مقدار شاخص محاسباتی Nash-sutcliffe در کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس نسبت به کالیبراسیون محلی تغییرپذیری کمتری دارد. دبی اوج رواناب شبیه‌سازی شده در کالیبراسیون محلی در مقایسه با رواناب مشاهده‌ای و همچنین حجم رواناب شبیه‌سازی شده در کالیبراسیون محلی در مقایسه با رواناب مشاهده‌ای اختلاف کمتری نسبت به این پارامترها در کالیبراسیون بزرگ‌مقیاس دارد که این مقایسه نشان از برتری ظاهری کالیبراسیون محلی دارد. باین وجود هر دو کالیبراسیون در برآورد رواناب پاسخ‌های قابل قبولی ارائه دادند در حالی که پارامترهای به دست آمده در حالت عمومی یا بزرگ‌مقیاس حساسیت مکانی کمتری دارند. این موضوع امکان تعمیم نتایج واسنجی را به مناطق فاقد آمار بیشتر می‌کند. لذا همان‌طور که در بخش دوم این مطالعه از روش کالیبراسیون با استفاده از پارامترهای

بزرگ‌مقیاس نشان داده شد برای پروژه‌های میدانی توزیعی و پژوهشی مناسب می‌باشد ولی به‌طور موضعی کارایی روش محلی بیشتر بوده است که این نتایج پاراجکا (۲۰۰۵: ۱۶۸) هماهنگ است. هر دو روش در حوضه کوه سوخته با مساحت یکسان استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد که این دو روش واسنجی با هم تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند و هزینه‌ای که پارامتره کردن بزرگ‌مقیاس استفاده می‌شود در واقع صرف کاهش حساسیت به وابستگی مکانی و ایستایی بهتر پارامترها می‌شود که منجر به تولید نتایج قابل اعتمادتر می‌شود. به‌طور کلی با استفاده از پارامترهای بزرگ‌مقیاس در زمان صرفه‌جویی می‌شود که با نتایج تروی (۲۰۰۸: ۸)، پوخرل (۲۰۰۸: ۱۱) و بون (۲۰۰۱: ۹) هم‌خوانی دارد. تحلیل حساسیت عوامل نشان می‌دهد پارامترهایی مانند نفوذناپذیری و نگهداشت اولیه حساسیت بسیار بالایی را در منطقه دارند. همچنین مدل نسبت به تعیین زمان تأخیر، عمل وابستگی زمانی را نشان می‌دهد که رسیدن به حالتی عمومی را دشوار می‌کند. تحقیقات تکمیلی برای رسیدن به زمان تأخیر قابل اعتماد به صورت بزرگ‌مقیاس برای شبیه‌سازی رواناب برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود.

کتابنامه

- بحری، معصومه؛ دستورانی، محمدتقی؛ ۱۳۹۶. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر پاسخ هیدرولوژیک حوزه آبخیز اسکندری. جغرافیا و مخاطرات محیطی. شماره ۲۲. صص ۳۷-۵۷.
- تلوری، عبدالر سول؛ ۱۳۷۵. مدل‌های هیدرولوژی به زبان ساده. چاپ. تهران: انتشارات موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور.
- سلیمانی، کریم و دیگران؛ ۱۳۸۷. پتانسیل تولید سیل در حوضه‌های آبخیز با استفاده از مدل HEC-HMS در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی حوضه معرف کسپلیان). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. شماره ۶۵. صص ۵۱-۶۰.
- علیزاده، امین؛ ۱۳۹۰. اصول کاربردی هیدرولوژی. چاپ. مشهد: انتشارات آستان قدس رضوی.
- کریمی، مریم و دیگران؛ ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم‌افزاری HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهلگری). مجله پژوهش‌های آب ایران. شماره ۹. صص ۲۹-۳۸.
- مراد نژادی، مریم و دیگران؛ ۱۳۹۴. الویت بندی زیر حوضه‌های مناسب بهره‌برداری جنگل با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: جنگل خیرود). مجله فراورده‌های چوب. مجله منابع طبیعی ایران. شماره ۲، صص ۴۰۵-۴۱۸.
- مهدوی، محمد؛ ۱۳۸۶. هیدرولوژی کاربردی. چاپ، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- Abdulla, F and D. Lettenmaier., 1997. Development of regional parameter estimation equations for a macroscale hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 197(1-4), 230-257.

- Adamowski, J. (2013). Using support vector regression to predict direct runoff, base flow and total flow in a mountainous watershed with limited data in Uttaranchal, India. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, 45(1), 71-83.
- Agrawal, A. (2005). *A data model with pre-and-post processor for HEC-HMS* (Unpublished master s thesis). Texas A & M University, Texas, America.
- Ahn, G. (2007). *The effect of urbanization on the hydrologic regim of the bigdarby creek watershed* (Unpublished doctoral dissertation). Ohio State University, Ohio, America.
- Alexander Braud, J. (2009). *Impact of watershed delineation detail on hydrologic process modeling in low slop areas* (Unpublished master s thesis). Louisiana State University, Louisiana, America.
- Asadi, A., & Boustani, F. (2013). Performance evaluation of the HEC-HMS hydrologic model for lumped and semi-distributed stormflow simulation (StudyArea: Delibajak Watershad). *American journal of engineering research (AJER)*, 2(11), 115-121.
- Bardossy, A., & Das, T. (2008). Rainfall network on model calibration and application. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(1), 77-89.
- Bendient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2013). *Hydrology and floodplain analysis*. England London :Pearson Publishing.
- Beven, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Science*, 5(1), 1-12.
- Bhadra, A., Panigrahy, N., Singh , R., Raghuwanshi, N. S., Mal, B. C., & Tripathi, M. P. (2008). Development of a geomorphological instantaneous unit hydrograph model for scantily gauged watersheds. *Journal of environmental modelling and software*, 23(1), 1013-1025.
- Bloschl, G. (2001). Scaling in hydrology. *Hydrol Processes*, 15(4), 709° 711.
- Boggs, J. L., & Sun, G. (2011). Urbanization alters watershed hydrology in the Piedmont of North Carolina. *Ecohydrology*, 4(2), 256-264.
- Booij, M. J. (2003). Determination and integration of appropriate spatial scales for river basin modeling. *Hydrol Processes*, 17(13), 2581-2598.
- Bormann, H. (2006). Impact of spatial data resolution on simulated catchment water balances and model performance of the multiscale TOPLATS model. *Hydrology and earth System Science*, 10(2), 165-179
- Butts, M. B., Payne, J. T., Kristensen, M., & Madsen, H. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modeling uncertainty for stream flow prediction. *Journal of Hydrology*, 298(1-4), 242-266.
- Cabral Moreira, A. A., 2013. Modelagem hidrologica da bacia hidrografica do Rio Granjeiro-Crato-CE. (MSc) Thesis. Universidade Federal do Ceara, 164.
- Grove, M., Harbor, J., Engle, B. (1998). Composite vs. distributed curve numbers: Effects on estimates of storm runoff depths. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(5), 1015-1023.
- Hundecha, Y., & Bárdossy, A. (2004). Modeling effect of land use changes on runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, 292(1), 281° 295.
- Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modelig System. (2013). *Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modelig System(HEC-HMS) Users manual (Version 4.0)*. US Army Crops of Engineers.
- Ibrahim-Bathis, K., Ahmed, S.A. (2016). Rainfall-runoff modelling of Doddahalla watershed. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 1-16.
- Karabowa, B., Sikorska, A. E., Banasik, K., & Kohnova, S. (2012). Parameters determination of a conceptual rainfall-runoff model for a small catchment in Carpathians. *Annals of Warsaw*

- University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 44(2), 155-162.
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42(3).
- Lu, H., Hou, T., Horton, R., Zhu, Y., Chen, X., Jia, Y., Wang, W., & Fu, X. (2013). The stream flow estimation using the xinanjiang rainfall runoff model and dual state-parameter estimation method. *Journal of Hydrology*, 480(1), 102-114.
- Mahmood, R., Jia, S., & Babel, M. (2016). Potential impacts of climate change on water resources in the Kunhar river basin, Pakistan. *Water*, 8 (1), 2-24.
- Noori, N., Kalin, L., Sen, S., Srivastava, P., Lebleu, C. (2016). Identifying areas sensitive to land use/land cover change for downstream flooding in a coastal Alabama watershed. *Regional Environmental change*, 16(6), 1833-1845.
- Olang, L. O., & Furst, J. (2011). Effects of land cover change on flood peak discharges and runoff volumes: Model estimates for the Nyando River Basin, Kenya. *Hydrological Processes*, 25(1), 80-89.
- Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2005). A comparison of regionalization methods for catchment model parameters. *Hydrology and earth system sciences discussions*, 9(3), 157° 171.
- Pokhrel, P., & Gupta, H. V. (2010). On the use of spatial regularization strategies to improve calibration of distributed watershed models. *Water Resources Research*, 46(1).
- Pokhrel, P., Gupta, H. V., & Wagener, T. (2008). A spatial regularization approach to parameter estimation for a distributed watershed model. *Water Resources Research*, 44(12).
- Samaniego, L., Kumar, R., & Attinger, S. (2010). Multiscale parameter regionalization of a grid based hydrologic model at the mesoscale. *Water Resources Research*, 46(5), 1-25.
- Seneviratne, S., & Stöckli, R. (2008). The role of land atmosphere interactions for climate variability in Europe, *Climate Variability and Extremes During the Past 100 Years*, 33(1), 179° 194.
- Sup, M. S., Taley, S. M., & Kale, M. U. (2015). Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS for Wan river basin. *International journal of research in engineering, science and technologies*, 28(1), 21-30.
- Troy, T., Wood, E. F., & Sheffield, J. (2008). An efficient calibration method for continental scale land surface modeling, *Water Resources Research*, 44(9).
- Vassova, D. (2013). Comparison of rainfall-runoff models for design discharge. *Soil and Water Research*, 8(1), 26-33.
- Walega, A., & Ksiazek, L. (2015). The effect of a hydrological model structure and rainfall data. *Annals of warsaw university of life sciences – SGGW* 47(4), 305-321.
- Walter Drake, Ch. (2014). Assessment of flood mitigation strategies for reducing peak discharges in the upper Cedar River watershed (Unpublished master s thesis). University of Iowa, Iowa, America.

