

تحلیل تأثیر نوع بارش بر شبیه‌سازی دبی جریان در حوضه آبخیز تالار و خرم‌آباد

محمد گلشن* - دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری
عبدالله پیرینا - دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری
پیام ابراهیمی - دانشجوی دکتری مهندسی آبخیزداری، دانشگاه تهران، تهران
اباذر اسمعیلی عوری - دانشیار مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۱۹

وصول: ۱۳۹۲/۰۴/۳۰

چکیده

به‌کارگیری مدلی که جامعیت و کارایی بالایی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های مختلف دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، کارایی مدل ارزیابی آب‌و‌خاک در شبیه‌سازی رواناب حاصل از بارش‌های مختلف در حوضه آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۴۶۷ کیلومترمربع و در حوضه آبخیز تالار با مساحت ۲۰۵۷ کیلومترمربع ارزیابی شد. مقدار بارندگی در حوضه آبخیز خرم‌آباد ۵۶۰ و در حوضه آبخیز تالار ۶۱۲ میلی‌متر است و هر دو منطقه دارای اقلیم نیمه‌مرطوب هستند. نقشه کاربری اراضی، خاک، مدل رقومی ارتفاع و اطلاعات هواشناسی برای هر دو منطقه تهیه شد. بعد از روی هم‌گذاری لایه‌های مکانی در حوضه خرم‌آباد ۲۲۳ و در حوضه تالار ۲۶۵ واحد پاسخ هیدرولوژیکی تعیین شد. با استفاده از برنامه‌آسنجی ابزار ارزیابی آب‌و‌خاک، آنالیز حساسیت پارامترها و تعیین مقادیر بهینه برای پارامترهای حساس انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر شماره منحنی در هر دو منطقه مطالعاتی از حساسیت بالایی برخوردار است. تعیین مقادیر بهینه کارایی مدل با ضرایب آماری R^2 و NS مورد ارزیابی قرار گرفت. مقادیر این ضرایب در حوضه خرم‌آباد به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۲ و در حوضه تالار برابر با ۰/۶۴ و ۰/۶۶ به دست آمد. نتایج نشان داد که نوع بارش منطقه بر روی کارایی مدل تأثیر دارد و رواناب حاصل از ذوب برف باعث کاهش کارایی مدل ارزیابی آب‌و‌خاک می‌شود. به طور کلی مدل در هر دو حوضه از کارایی مناسبی برخوردار است و می‌تواند به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی حوضه‌های آبخیز در این مناطق مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: شبیه‌سازی، اقلیم، رواناب، SWAT، SUFI2.

مقدمه

تخمین مقدار رواناب ایجادشده در حوضه‌های آبخیز و همچنین پیش‌بینی انواع فرایندهای هیدرولوژیکی که در برخی از مناطق نیز با پیچیدگی‌های خاصی همراه است، یکی از موضوعات مهم در مطالعات هیدرولوژیکی است (عطفی، ۱۳۹۳). کشور ایران به لحاظ عرض جغرافیایی و همجواری‌اش با پرفشار جنب‌حاره‌ای، علاوه بر کمبود بارش، رژیم بارندگی نامنظمی نیز دارد (بابائی فینی و فرج‌زاده، ۱۳۸۱). شبیه‌سازی رواناب در این حوضه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی وجود دارد: رویکرد حوضه جفتی که به دلیل دشواری یافتن حوضه‌های جفتی بزرگ یا متوسط فقط در حوضه‌های کوچک با مساحت کمتر از ۱۰۰ کیلومتر مربع به کار برده می‌شوند (لی^۱ و همکاران، ۲۰۰۹)، روش آماری، رویکردی بدون پیچیدگی است که با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در حوضه، آنالیزهای آماری را انجام می‌دهد، اما این روش، فرایندهای فیزیکی در داخل حوضه را در نظر نمی‌گیرد (وی^۲ و همکاران، ۲۰۱۳)، از این رو مدل‌های هیدرولوژیکی به عنوان روش مناسب‌تر در نظر گرفته می‌شوند، زیرا روابط بین اقلیم، کاربری و اجزاء هیدرولوژیکی را در نظر می‌گیرند (خوی و سوتسگی^۳، ۲۰۱۴). لی و گائو^۴ (۲۰۱۵) روش اصلی ارزیابی کمی تأثیر اقلیم بر دبی جریان را استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بیان کرده است.

ابزار ارزیابی آب‌وخاک^۵ به عنوان ابزاری مؤثر در مطالعه هیدرولوژی حوضه در سطح جهان ثابت شده است (فیسکلین^۶ و همکاران، ۲۰۱۳؛ پان‌هالکر^۷، ۲۰۱۴). این مدل، نیمه‌توزیعی و بزرگ‌مقیاس است که در مناطق چمنزار ایالت تگزاس توسعه یافته و در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی در انجام مطالعات و مدیریت حوضه‌های آبخیز کشور مورد استفاده قرار گرفته است (گلشن و همکاران، ۱۳۹۴).

حوضه‌های انتخابی در این پژوهش، دارای شرایط فیزیوگرافی و عرض جغرافیایی مختلفی هستند که منجر به اختلافات بارشی در این حوضه‌ها شده است. مدل‌های هیدرولوژیکی در اقلیم‌های مختلف دارای کارایی متفاوتی هستند که بررسی میزان کارایی مدل‌ها در اقلیم‌های مختلف با توجه به شرایط اقلیمی ایران حائز اهمیت فراوان است. به صورت گسسته مطالعاتی در اقلیم‌های مختلف انجام شده است که به طور مختصر بیان می‌شود. باستانی اله‌آبادی و همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از مدل ارزیابی آب‌وخاک رواناب حوضه آبخیز کردان در قزوین را شبیه‌سازی کرده‌اند برای این منظور، مدل ارزیابی آب‌وخاک برای سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ واسنجی و برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد که این مدل، با ضریب تبیین^۸ و ضریب کارایی^۹ برابر با ۰/۷۲ و ۰/۸۶ از کارایی مناسبی در منطقه برخوردار است. اخوان و جودی حمزه‌آباد (۱۳۹۴)، با استفاده از مدل ارزیابی آب‌وخاک، میزان جریان ورودی به دریاچه ارومیه را شبیه‌سازی کردند، داده‌های دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۱ را برای واسنجی و داده‌های دوره ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۸ را برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار دادند، برای صحت‌سنجی مدل نیز از الگوریتم برازش متوالی عدم قطعیت^{۱۰} استفاده کردند، نتایج نشان‌دهنده بالابودن کارایی

1- Li

2- Wei

3- Khoi & Suetsugi

4- Li & Gao

5- Soil and Water Assessment Tools

6- Ficklin

7- Panhalkar

8- Squared Regression Coefficient

9- Coefficient of Performance

10- Sequential Uncertainty Fitting

مدل ارزیابی آب‌و‌خاک در این منطقه است. کاویان و همکاران (۱۳۹۴)، با استفاده از مدل ارزیابی آب‌و‌خاک در حوضه آبخیز هراز میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب منطقه را ارزیابی کردند، نتایج نشان داد که این مدل با نمایه‌های آماری ضریب تبیین و نش - ساتکلیف^۱ به ترتیب برابر با ۰/۸۸ و ۰/۷۷ در ایستگاه هیدرومتری کره‌سنگ از دقت بالایی برای شبیه‌سازی رواناب منطقه برخوردار است. ژو^۲ و همکاران (۲۰۱۵)، کارایی مدل ارزیابی آب‌و‌خاک را در اقلیم مرطوب با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های دریافتی از ماهواره مقایسه کردند. نتایج نشان داد که میانگین بارش، ۱۰٪ با میانگین واقعی اختلاف دارد و نتایج شبیه‌سازی مدل، با ضریب کارایی و خطای نسبی^۳ به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۱۰، از کارایی مناسبی برخوردار است. لی و گائو (۲۰۱۵)، تغییرات سناریو بارش بر روی جریان رودخانه را بررسی کرده‌اند، نتایج نشان داد که تغییرات دبی جریان بیش از تغییرات بارندگی هستند و با افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی بارندگی سالانه کارایی مدل افزایش و با کاهش ۱۰ و ۲۰ درصدی بارندگی کارایی مدل کاهش می‌یابد. لیو^۴ و همکاران (۲۰۱۶) روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی تغییرات اقلیم را با استفاده از مدل ارزیابی آب‌و‌خاک بررسی کردند، نتایج نشان داد که استفاده از مدل جامع برای بررسی روند تغییرات دبی جریان از کارایی بالایی برخوردار است.

تا کنون مطالعه‌ای جهت ارزیابی تأثیر نوع بارش بر کارایی مدل در حوضه‌هایی با اقلیم‌های متفاوت انجام نشده، در پژوهش حاضر، به این موضوع پرداخته شده است. همچنین هدف از اجرای این تحقیق، تعیین و مقایسه پارامترهای حساس در مناطق مطالعاتی و ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی دبی جریان این مناطق است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند درک بهتری از تأثیر خصوصیات حوضه آبخیز بر بیلان آبی منطقه و تأثیر آن بر عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی جریان را فراهم کند.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز خرم‌آباد با مساحت ۲۴۶۷ کیلومترمربع در مرکز استان لرستان واقع شده است. این حوضه، در محدوده جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوضه به ترتیب ۱۱۰۲ و ۲۵۴۵ متر است و متوسط درجه حرارت و بارندگی سالانه در آن به ترتیب ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد و ۵۸۵ میلی‌متر است. حوضه آبخیز تالار نیز با مساحت ۲۰۵۷ کیلومترمربع در شمال مازندران واقع شده است. حوضه تالار، در محدوده جغرافیایی ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع حداقل حوضه ۶۱ متر و حداکثر آن ۳۸۹۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه ۷۱۲ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱)؛ که با توجه به طبقه‌بندی دومارتن حوضه‌های مورد مطالعه در اقلیم نیمه‌مرطوب واقع شده‌اند.

حوضه‌های انتخابی از لحاظ متوسط بارندگی سالانه و مساحت مشابه هستند؛ اما به دلیل اختلافات عرض جغرافیایی و فیزیوگرافی، دارای بارش‌های متفاوتی می‌باشند. به طوری که حوضه آبخیز تالار با توجه به توپوگرافی و عرض جغرافیایی منطقه نسبت به حوضه آبخیز خرم‌آباد دارای بارش بیشتری است. با در نظر گرفتن وقایع بارش رخ داده در ماه‌های زمستان در دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد به عنوان بارش برف، در دوره آماری ۲۰۰۳ تا

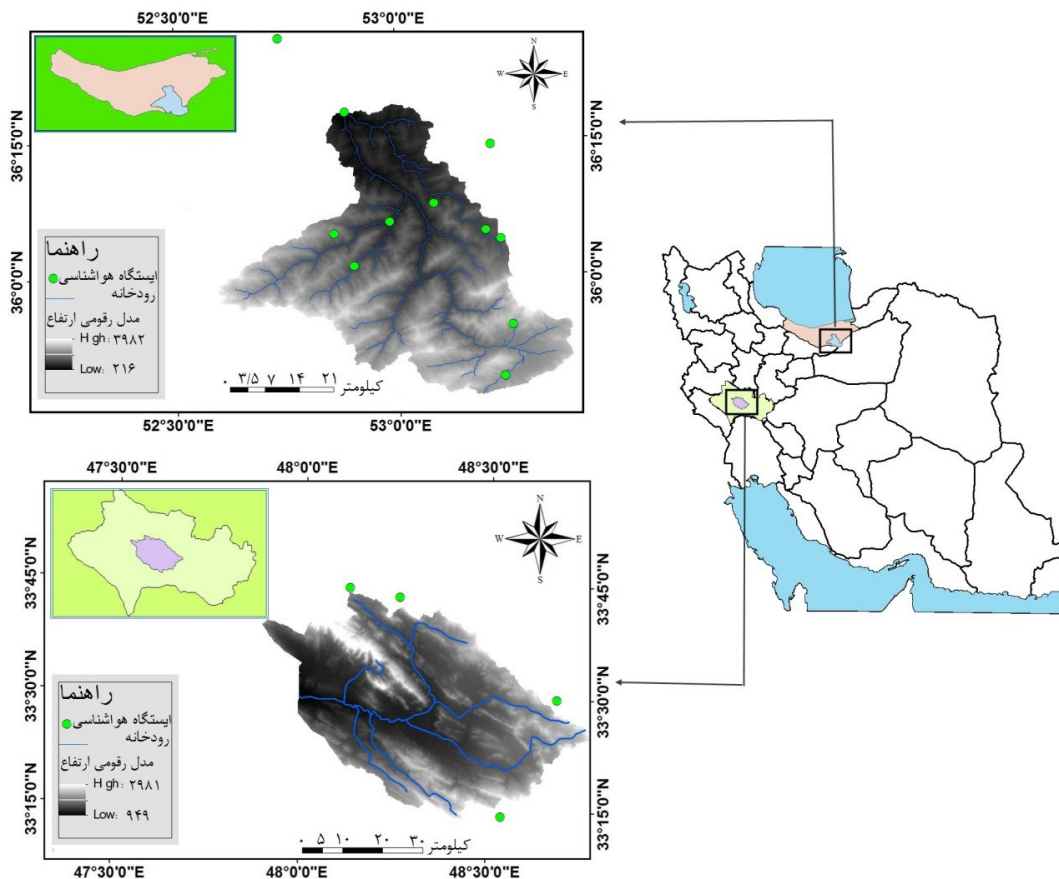
1- Nash_Sutcliffe

2- Zuo

3- Regression

4- Liu

۲۰۱۰ در حوضه آبخیز تالار تعداد ۶۲ واقعه بارش برف با آب معادل ۴۶۰ میلی‌متر و در حوضه آبخیز خرم‌آباد تعداد ۴۵ واقعه با آب معادل برف ۲۰۱ میلی‌متر اتفاق افتاده است. با توجه به فرایند شبیه‌سازی ابزار ارزیابی آب‌و‌خاک، این اختلاف بارش باعث تفاوت در دقت مدل می‌شود.



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه

چرخه هیدرولوژی در مدل ارزیابی آب‌و‌خاک

ابزار ارزیابی آب‌و‌خاک یک مدل مفهومی - نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه است که دارای بازده محاسباتی بالایی است. این مدل، به صورت پیوسته زمانی است که در گام‌های زمانی متفاوتی به صورت ساعتی، روزانه و یا سالانه اجرا می‌شود (نیتچ^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). بخش‌های اصلی مدل، شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان است (گلشن و همکاران، ۱۳۹۴). چرخه هیدرولوژیکی در این مدل بر اساس بیلان آبی شبیه‌سازی می‌شود که در رابطه ۱ آورده شده است (ین^۲ و همکاران، ۲۰۱۵):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، SW_t : مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، t : زمان (روز)، SW_0 : مقدار آب موجود در خاک (میلی‌متر)، R_{day} : مقدار بارش در روز i ام (میلی‌متر)، Q_{surf} : مقدار رواناب سطحی در روز i ام (میلی‌متر)، E_a : مقدار تبخیر و تعرق در روز i ام (میلی‌متر)، W_{seep} : مقدار آب نفوذ کرده به منطقه قشری در پروفیل خاک

1- Neitsch

2- Yen

(میلی‌متر) و Q_{gw} : مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر) است.

شبیه‌سازی رواناب سطحی در مدل ارزیابی آب‌و‌خاک با دو روش زیر می‌تواند صورت گیرد:

الف: گرین-آمپت: در این روش، با استفاده از محاسبات رواناب، داده‌های بارش و هدایت هیدرولیکی، مقدار رواناب محاسبه می‌شود. برای تعیین رواناب سطحی در مدل ارزیابی آب‌و‌خاک از روش گرین-آمپت و لارسون-مین استفاده شده است. میزان نفوذپذیری از روش لارسون-مین و گرین-آمپت به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$F_{inft} = K_s \times \left(1 + \frac{\Psi_{\omega f} + \Delta\theta_v}{F} \right) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، F_{inft} : مقدار نفوذپذیری در واحد زمان، K_s : هدایت هیدرولیکی مؤثر، $\Psi_{\omega f}$: پتانسیل جبهه رطوبتی، $\Delta\theta_v$: تغییرات رطوبت و F_{inft} : نفوذپذیری تجمعی در زمان است (نیتچ و همکاران، ۲۰۱۱).

ب: منحنی SCS: در این روش، شماره منحنی خاک و مقدار نفوذ آب نقش اساسی دارند. این روش در سال ۱۹۵۰ به وسیله سازمان حفاظت آب‌و‌خاک آمریکا مورد استفاده قرار گرفت (رابطه ۳).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} \cdot 1.48)^2}{(R_{day} \cdot 1.48)} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن Q_{surf} : ارتفاع رواناب، R_{day} : ارتفاع باران و S : پارامتر نگهداشت خاک است، این پارامتر، از نظر مکانیکی به سبب تغییرات در خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب و از نظر زمانی به علت تغییر در مقدار آب‌و‌خاک در واحدهای مختلف متغیر است.

داده‌های ورودی مدل

اطلاعات مکانی مورد نیاز شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع^۱، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک هستند که هر سه این نقشه‌ها با اندازه سلول ۲۸ متری تهیه و در قالب لایه‌های رستری به مدل معرفی شدند. مدل برای شناسایی خصوصیات ظاهری و تشخیص محل آبراهه‌ها و نیز زیرحوضه‌ها از نقشه مدل رقومی ارتفاع استفاده می‌نماید. اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، درجه حرارت حداقل، درجه حرارت حداکثر بر پایه زمانی روزانه از ۶ ایستگاه هواشناسی در داخل حوضه برای هر منطقه تهیه شد (جدول ۱).

جدول ۱. داده‌های ورودی به مدل

اطلاعات	تشریح	منبع
جریان رودخانه	ایستگاه هیدرومتری شیرگاه (خروجی زیرحوضه ۱)	شرکت آب منطقه‌ای
	ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد (خروجی زیرحوضه ۱۰)	شرکت آب منطقه‌ای
هواشناسی	بارندگی و دما: خرم‌آباد: چم انجی، دهنو، کاکارضا، خرم‌آباد، سراب‌سی و سرخاب تالار: آلاشت، درزی کلا، قراخیل، پلند، گل‌افشان و سنگده	سازمان هواشناسی کشور
نقشه رقومی ارتفاع	۲۸ متری	سازمان زمین‌شناسی کشور
کاربری اراضی	حوضه آبخیز خرم‌آباد با ۱۱ نوع کاربری اراضی	شرکت آب منطقه‌ای
	حوضه آبخیز تالار با ۷ نوع کاربری اراضی	
نقشه خاک	حوضه آبخیز خرم‌آباد با ۳۱ نوع واحد خاک	اداره منابع طبیعی استان لرستان
	حوضه آبخیز تالار با ۵۸ نوع واحد خاک	اداره منابع طبیعی استان مازندران

مدل ارزیابی آب‌وخاک برای شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی حوضه به آمار و اطلاعات بلندمدت روزانه یک ایستگاه سینوپتیک به عنوان ایستگاه مرجع نیاز دارد که برای حوضه خرم‌آباد از آمار ۳۰ ساله ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد و برای حوضه تالار از آمار ۳۱ ساله ایستگاه قراخیل استفاده شد. بارندگی‌هایی که در درجه حرارت‌های کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهند به عنوان بارش برف در نظر گرفته شدند که با توجه به درجه حرارت به رواناب یا نگهداشت برف تبدیل می‌شوند.

تحلیل حساسیت، واسنجی و صحت‌سنجی مدل ارزیابی آب‌وخاک

واسنجی مدل توزیعی یا نیمه‌توزیعی یک فرایند پیچیده است (لرات^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ پچلیوانیدیس^۲ و همکاران، ۲۰۱۱: ۲۰۱). زیاد بودن تعداد پارامترها، هم‌پوشانی پارامترها، عدم قطعیت و عدم توانایی تشخیص مسئله در این موضوع تأثیرگذار است (بیون^۳، ۲۰۰۱؛ گوتزینگر و باردوسی^۴، ۲۰۰۷، کیرچنر^۵، ۲۰۱۲). در این مطالعه، مدل ارزیابی آب‌وخاک به نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۶ الحاق شد و این مدل به منظور شبیه‌سازی دبی جریان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برنامه واسنجی و صحت‌سنجی ابزار ارزیابی آب‌وخاک که توسط عباسپور و همکاران (۲۰۰۷)، توسعه داده شده است، به منظور آنالیز حساسیت پارامترها، واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل ارزیابی آب‌وخاک از الگوریتم برازش متوالی عدم قطعیت استفاده شد، زیرا این الگوریتم، از قابلیت مناسبی در تغییر و آنالیز تعداد زیادی از پارامترها در کمترین تعداد تکرار مدل برخوردار است (یانگ^۷ و همکاران، ۲۰۰۸؛ ژو^۸ و همکاران، ۲۰۱۵؛ اخوان و همکاران، ۱۳۸۹). آنالیز حساسیت جهانی که در برنامه واسنجی و صحت‌سنجی مدل ارزیابی آب‌وخاک به کار برده می‌شود به منظور آنالیز حساسیت پارامترها مورد استفاده قرار گرفت.

ارزیابی کارایی مدل

برای ارزیابی کارایی مدل و محدود کردن جواب‌ها به سمت جواب یگانه، گاهی لازم است چندین معیار آماری مورد استفاده قرار گیرد (گاسمن^۹ و همکاران، ۲۰۰۷؛ سانتی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۱). در این پژوهش، ارزیابی مدل به کمک ضریب NS و R^2 انجام شد (جدول ۲)؛ که n : تعداد مشاهدات، Q_i^{sim} و Q_i^{obs} : مقادیر متناظر مشاهده و پیش‌بینی شده، \bar{Q}_i^{sim} و \bar{Q}_i^{obs} : نیز میانگین ریاضی مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده و b : شیب خط رگرسیونی است؛ بنابراین ابتدا داده‌های اندازه‌گیری در سطح PPU۹۵ قرار می‌گیرند سپس در هر مرحله، پارامترهای قبلی تجدید نظر شده و فاصله اطمینان ۹۵٪ پارامترها بر اساس ماتریکس همبستگی کاهش داده می‌شود که در نهایت منجر به کاهش عدم قطعیت مدل می‌شود.

- 1- Lerat
- 2- Pechlivanidis
- 3- Beven
- 4- Gotzinger & Bgrdossy
- 5- Kirchner
- 6- Geographic information System (GIS)
- 7- Yang
- 8- Zuo
- 9- Gassman
- 10- Santhi

جدول ۲. معیارهای مورد استفاده برای ارزیابی کارایی مدل ارزیابی آب‌و‌خاک

معیار	فرمول	محدوده	بدون خطا
ضریب همبستگی	$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \bar{Q}_i^{sim})(Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \bar{Q}_i^{sim})^2 \sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})^2}$	[۰، ۱]	$R^2=1$
ضریب نش - ساتکلیف	$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q}_i^{obs})^2} \right]$	[-∞، ۱]	$NS=1$

نتایج و بحث

در حوضه آبخیز خرم‌آباد از لحاظ نوع کاربری اراضی منطقه، کاربری اراضی دیم با ۰/۴۷ مساحت، از لحاظ بافت خاک موجود در منطقه بافت شنی - رسی - لومی با ۰/۵۱ مساحت حوضه و از نظر شیب حوضه شیب ۰/۱۲ تا ۰/۳۰٪ با ۰/۳۳ مساحت حوضه غالب هستند. همچنین در حوضه آبخیز تالار، کاربری اراضی مرتعی با ۰/۴۳، بافت خاک سیلتی لومی با ۰/۷۳ و شیب ۰٪ تا ۰/۱۲٪ با ۰/۳۷ مساحت حوضه غالب هستند که بعد از روی هم‌گذاری این لایه‌ها در حوضه خرم‌آباد ۲۲۳ و در حوضه تالار ۲۶۵ واحد پاسخ هیدرولوژیکی ایجاد شد. بعد از اجرای مدل در هر دو حوضه آبخیز متوسط بیلان آب در واحدهای هیدرولوژیکی و خروجی حوضه‌ها شبیه‌سازی شد.

دبی جریان در خروجی حوضه آبخیز

مدل با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و پارامترهای حساس واسنجی و صحت‌سنجی شد. نتایج آنالیز حساسیت نسبی در دوره واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم برازش متوالی عدم قطعیت نشان داد که ۷ پارامتر از حساسیت بالایی برخوردار هستند این پارامترها برای واسنجی مدل انتخاب شدند (جدول ۳). تغییر این پارامترها در طی تکرار فرایند از تأثیرگذاری بیشتری در شبیه‌سازی دبی جریان خروجی از حوضه‌های آبخیز برخوردارند (ژو و همکاران، ۲۰۱۵). بعد از واسنجی مدل با استفاده از پارامترهای حساس، محدوده حداقل، حداکثر و مقدار بهینه برای هر پارامتر مشخص شد (جدول ۴). نتایج آنالیز حساسیت پارامترها نشان داد که پارامتر شماره منحنی در هر دو حوضه از بیشترین حساسیت برخوردار است و بیانگر این موضوع است که محدوده حوضه‌های مطالعاتی به شدت تحت تأثیر تغییرات شماره منحنی و مقدار نفوذ است. حساسیت بالای این پارامتر در اجرای مدل ارزیابی آب‌و‌خاک در بسیاری از مطالعات مشاهده شده است (گلشن و همکاران، ۱۳۹۴؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۶).

جدول ۳. نتایج آنالیز حساسیت در حوضه‌های آبخیز مورد مطالعه

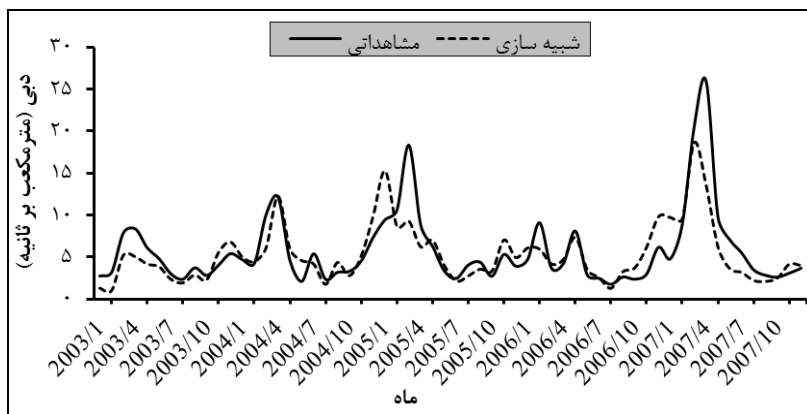
تالار (Talar)			خرم‌آباد (Khorramabad)		
P-Value	t-Stat	پارامتر	P-Value	t-Stat	پارامتر
۰/۹۰	۰/۱۲	V_SURLAG	۰/۰۰	۴/۶۷	R_SOL_K
۰/۶۷	۰/۴۲	V_SMFMX	۰/۰۰	۵/۱۷	V_CH_K2
۰/۱۰	۱/۶۷	V_SMTMP	۰/۰۰	۶/۴۹	R_SFTMP
۰/۰۰	۷/۵۷	R_SOL_BD	۰/۰۰	۶/۹۷	R_SOL_BD
۰/۰۰	۱۱/۹	V_RCHRГ_DP	۰/۰۰	۹/۳	V_RCHRГ_DP
۰/۰۰	۱۷/۳	R_SOL_K	۰/۰۰	۱۲/۸	V_ALPHA_BNK
۰/۰۰	۴۷/۷	R_CN2	۰/۰۰	۵۱/۴	R_CN2

جدول ۴. بازه مقادیر پارامترها همراه با مقادیر بهینه با استفاده از الگوریتم برازش متوالی عدم قطعیت

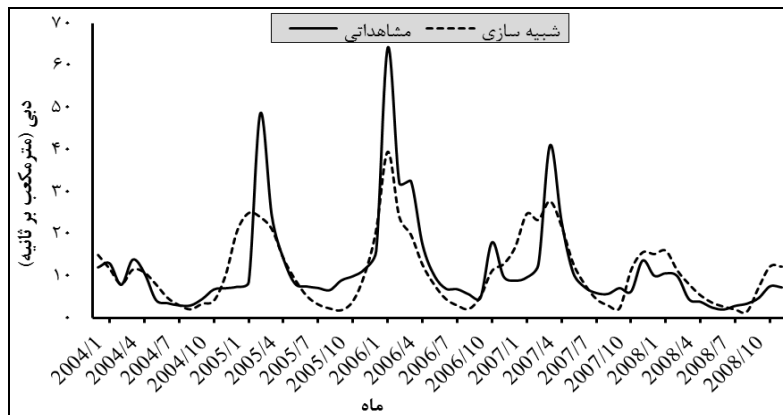
حوضه تالار			حوضه خرم‌آباد			
پارامتر	حداقل	حداکثر	پارامتر	بهینه	حداکثر	حداقل
r_CN2	-۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	r_CN2	۰/۳۳۵	۰/۰۱۶	-۰/۰۱۶
v_ALPHA_BNK	-۰/۴۹۵	۰/۴۹	r_SOL_K	۰/۰۹۴	۰/۴۹	-۰/۴۹۵
v_Rchrg_Dp	-۰/۴۹۵	۰/۴۹	v_Rchrg_Dp	۰/۰۵۶	۰/۴۹	-۰/۴۹۵
r_SOL_BD	-۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	r_SOL_BD	۰/۹۳۹	۰/۰۱۳	-۰/۰۱۳
v_SFTMP	-۰/۰۰۵	۰/۰۴۹	v_SMTMP	۴/۵۸۱	۰/۰۴۹	-۰/۰۰۵
v_CH_K2	-۰/۰۷۸	۰/۰۷	v_SMFMX	۷۶/۷۸۶	۰/۰۷	-۰/۰۷۸
r_SOL_K	-۰/۰۰۸۸	۰/۰۸۸	v_SURLAG	۰/۷۱۷	۰/۰۸۸	-۰/۰۰۸۸

r: به معنای جایگزین کردن مقادیر موجود با مقادیر پارامتر v: به معنای ضرب کردن مقادیر موجود در مقدار پارامتر

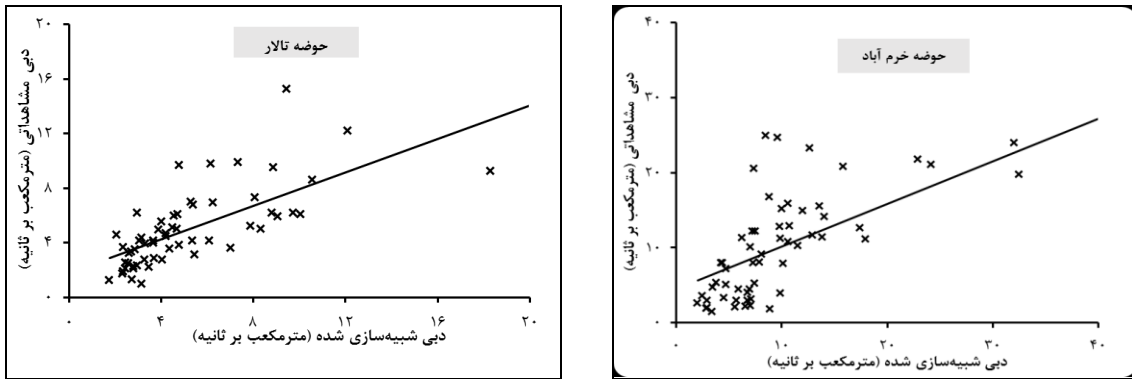
هیدروگراف دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در حوضه آبخیز خرم‌آباد برای دوره ۲۰۰۴-۲۰۰۸ و در حوضه آبخیز تالار برای دوره ۲۰۰۳-۲۰۰۷ در شکل ۲ و ۳ آورده شده است. همچنین نمودار ضریب تبیین بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس پیشنهاد بینامن و شوماکر^۱ (۲۰۰۵)، شبیه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی زمانی می‌تواند رضایت‌بخش باشد که مقدار ضریب تبیین بیشتر از ۰/۶۰ و ضریب نش - ساتکلیف بیشتر از ۰/۵ باشد. بررسی ضرایب آماری به دست آمده (جدول ۵) نشان می‌دهد کارایی مدل در هر دو منطقه قابل قبول است.



شکل ۲. دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی مدل ارزیابی آب‌و خاک برای حوضه آبخیز خرم‌آباد



شکل ۳. دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی مدل ارزیابی آب‌و خاک برای حوضه آبخیز تالار

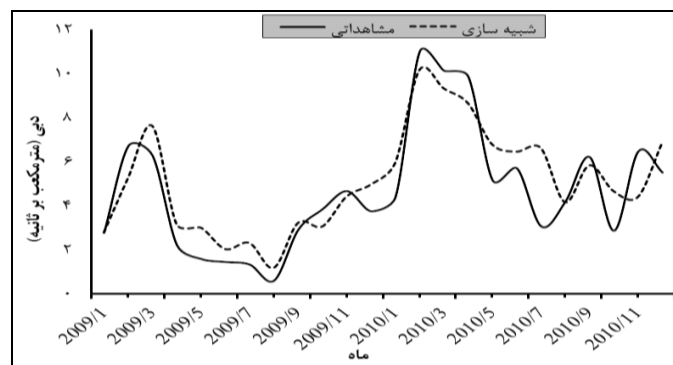


شکل ۴. همبستگی بین داده‌ها به ترتیب در حوضه آبخیز خرم‌آباد و تالار در دوره واسنجی

جدول ۵. خلاصه نتایج کارایی مدل در دوره واسنجی.

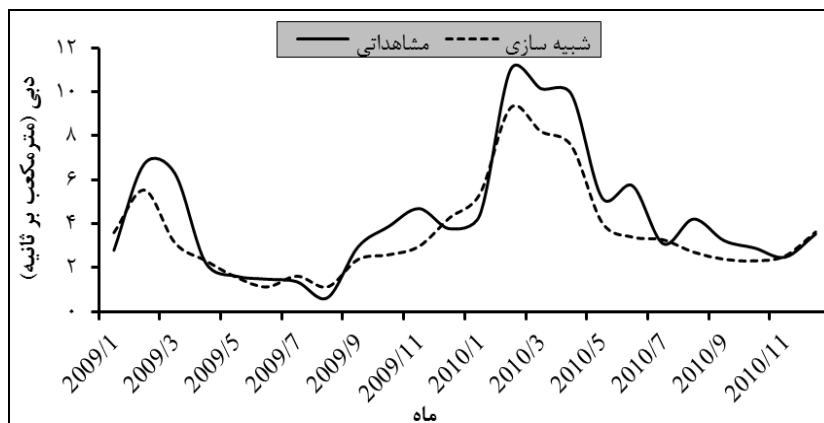
حوضه آبخیز	طول دوره آماری	R ²	NS
خرم‌آباد	۶۰ ماه	۰/۷۴	۰/۷۲
تالار	۶۰ ماه	۰/۶۴	۰/۶۶

صحت‌سنجی نتایج مدل توسط داده‌های رواناب مشاهده‌ای در ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۹ و در ایستگاه هیدرومتری تالار برای دوره ۲۰۰۸-۲۰۰۹ انجام شد. نتایج این صحت‌سنجی در شکل ۵ و ۶ ارائه شده است. نمودار همبستگی بین دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل دقت مناسبی را نشان می‌دهد (شکل ۷). در حوضه آبخیز تالار پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف یعنی دمای پایه ذوب توده برف^۱ و فاکتور بیشترین نسبت ذوب برف در طول سال^۲ به عنوان پارامترهای حساس مشخص شده است اما فرایند ذوب برف به خوبی شبیه‌سازی نشده است که در برخی از مطالعات انجام شده به این موضوع اشاره شده است (کارلسون^۳ و همکاران، ۲۰۱۶؛ عباسپور و همکاران، ۲۰۰۷؛ کاویان و همکاران، ۱۳۹۲). مقدار نمایه‌های آماری ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی مدل برای مناطق مطالعاتی در جدول ۶ آورده شده است. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل در ایستگاه‌های مورد بررسی حاکی از آن است که مدل ارزیابی آب‌وخاک در شبیه‌سازی رواناب در دوره زمانی مورد مطالعه دقت مناسبی دارد که با نتایج برخی پژوهش‌ها مطابقت دارد (هوا^۴ و همکاران، ۲۰۱۲؛ سیتگن^۵ و همکاران، ۲۰۱۰).

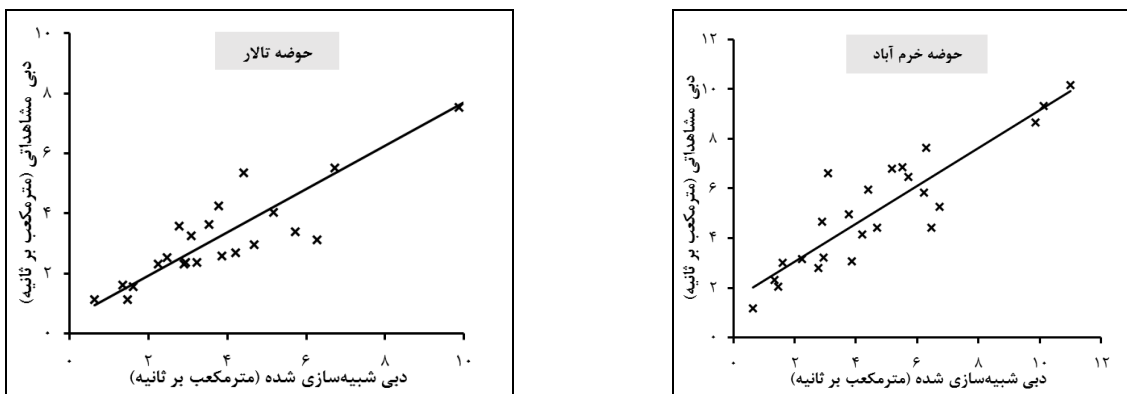


شکل ۵. دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در دوره صحت‌سنجی مدل ارزیابی آب‌وخاک برای حوضه آبخیز خرم‌آباد

- 1- Snow Melt Base Temperature
- 2- Maximum Melt Rate for Snow During Year
- 3- Karlsson
- 4- Hwa
- 5- Setegn



شکل ۶. دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره صحت‌سنجی مدل ارزیابی آب‌و‌خاک برای حوضه آبخیز تالار



شکل ۷. همبستگی بین داده‌ها به ترتیب در حوضه آبخیز خرم‌آباد و تالار در دوره صحت‌سنجی

جدول ۶. خلاصه نتایج مدل در دوره صحت‌سنجی

حوضه آبخیز	طول دوره آماری	R ²	NS
خرم‌آباد	۲۴ ماه	۰/۶۶	۰/۶۳
تالار	۲۴ ماه	۰/۶۳	۰/۵۱

متوسط دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی در ایستگاه هیدرومتری خرم‌آباد به ترتیب ۱۱/۶۲۵ و ۱۱/۴۲۳ مترمکعب بر ثانیه و در ایستگاه هیدرومتری تالار به ترتیب ۵/۷۸ و ۵/۴۶۲ مترمکعب بر ثانیه است، در هر دو حوضه، جریان دبی متوسط به ترتیب ۰/۲۰۲ و ۰/۳۱۸ مترمکعب بر ثانیه کمتر شبیه‌سازی شده که نشان‌دهنده شبیه‌سازی کمتر رواناب توسط مدل ارزیابی آب‌و‌خاک است که در مطالعات گلشن و همکاران (۱۳۹۴)، در حوضه آبخیز هراز با اقلیم نیمه‌مرطوب این فرایند مشاهده شده است. توانایی این مدل در شبیه‌سازی دبی جریان در اقلیم‌های مختلف ثابت شده است (آذری و همکاران، ۱۳۹۲؛ وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۵؛ تامپی^۲ و همکاران ۲۰۱۰). با توجه به نمودارهای شبیه‌سازی شده دقت مدل در شبیه‌سازی زمان وقوع و مقدار دبی اوج در هر دو منطقه بالاست، اما با توجه به اینکه حوضه آبخیز تالار دارای بارش بیشتری به صورت برف است با وجود بالابودن متوسط بارندگی سالانه نسبت به حوضه آبخیز خرم‌آباد، مدل دارای دقت کمتری در این حوضه است که با نتایج مطالعات گلشن و همکاران (۱۳۹۴)، کاپیان و همکاران (۱۳۹۴) و کارلسون و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

1- Wang
2- Thampi

نتیجه‌گیری

عوامل مختلفی در تشکیل دبی جریان حوضه‌های آبخیز نقش دارند که در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی تأثیر نوع بارش بر روند دبی جریان رودخانه و شبیه‌سازی کارایی مدل هیدرولوژیکی ارزیابی آب‌و‌خاک، حوضه‌های خرم‌آباد و تالار انتخاب شده‌اند. این حوضه‌ها از لحاظ مساحت و متوسط بارندگی سالانه تقریباً مشابه هستند؛ بنابراین، مقیاس منطقه و مقدار بارندگی در مقایسه نتایج مدل تأثیر ندارند و اختلافات به دست آمده مربوط به تغییرات فرایندهای هیدرولوژیکی موجود در داخل حوضه‌های آبخیز است. مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی دبی جریان در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند که انتخاب مناسب‌ترین مدل برای اهداف خاص را مشکل می‌کند. هر کدام از این مدل‌ها در شرایط خاصی توسعه یافته‌اند که در صورت فراهم بودن این شرایط، مدل‌ها از کارایی بهتری برخوردارند. مدل ارزیابی آب‌و‌خاک نیمه‌توزیعی و بزرگ‌مقیاس است که در سال‌های اخیر به طور قابل توجهی در انجام مطالعات و مدیریت حوضه‌های آبخیز در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. حوضه‌های انتخابی در این پژوهش دارای شرایط فیزیوگرافی و عرض جغرافیای مختلفی هستند که منجر به تفاوت فرایندهای هیدرولوژیکی در این حوضه‌ها شده است. با توجه به شرایط اولیه ایجاد مدل، توانایی این مدل در شبیه‌سازی رواناب مناطق مرطوب با پستی و بلندی کم مناسب است. مقایسه ضرایب آماری به دست آمده نشان داد که مدل در شبیه‌سازی دبی جریان حوضه آبخیز خرم‌آباد در مقایسه با حوضه آبخیز تالار از دقت بالایی برخوردار است. نتایج به دست آمده ضمن بیان کارایی مدل در مناطق مورد مطالعه، تأثیر خصوصیات حوضه بر روند شبیه‌سازی را نیز نشان می‌دهد؛ بنابراین، می‌توان بیان داشت که مدل ارزیابی آب‌و‌خاک برای شبیه‌سازی دبی جریان در مناطق مرطوب و با بارش غالب به صورت باران از کارایی بالایی برخوردار است، اما برای مناطقی که بارش غالب آنها به صورت برف است و دارای فیزیوگرافی برجسته هستند ممکن است استفاده از این مدل نتایج مناسبی ارائه ندهد. به طور کلی، استفاده از این مدل و یا مدل‌های کامپیوتری دیگر به دلیل کاهش هزینه‌های عملیات صحرایی و به‌ویژه کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، می‌تواند جزء راهکارهای ممکن به منظور ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط‌زیست قلمداد شود.

منابع

- آذری، محمود؛ مرادی، حمیدرضا؛ ثقفیان، بهرام؛ فرامرزی، منیره (۱۳۹۲) ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه آبخیز گرگانرود. **آب‌و‌خاک مشهد**، ۲۷ (۳)، صص. ۵۴۷-۵۳۷.
- اخوان سمیرا؛ جودی حمزه‌آباد، آیدین (۱۳۹۴) شبیه‌سازی جریان ورودی به دریاچه ارومیه با استفاده از مدل SWAT، **علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی**، ۱۹ (۷۲)، صص. ۳۳-۲۳.
- اخوان، سمیرا؛ عابدی کویایی، جهانگیر؛ موسوی، سید فرهاد؛ عباسپور، کریم (۱۳۸۹) تخمین «آب آبی» و «آب سبز» با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان - بهار، **علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی**، ۱۴ (۵۳)، صص. ۳-۹.
- بابائی فینی، ام‌السلمه؛ فرج‌زاده، منوچهر (۱۳۸۱) الگوهای تغییرات مکانی و زمانی بارش در ایران. **مدرس علوم انسانی**، ۶ (۳)، صص. ۶۹-۵۱.
- باستانی‌اله‌آبادی، آرش؛ تلوری، عبدالرسول؛ حسینی، مجید (۱۳۹۱) ارزیابی مدل SWAT2009 در برآورد رواناب حوضه آبخیز کردان، **همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای**، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد.
- عطفی غلامرضا (۱۳۹۳) شبیه‌سازی بیلان آب و رسوب حوضه آبخیز اهرچای با استفاده از مدل SWAT و

- ArcGIS**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: مجید رئوف، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.
- کاوین، عطاالله؛ گلشن، محمد؛ روحانی، حامد؛ اسمعیلی، اباذر (۱۳۹۲) ارزیابی تأثیر خصوصیات فیزیوگرافی حوضه بر عملکرد مدل SWAT، **منابع آب و توسعه**، ۳، صص. ۱۹۳-۱۸۴.
- کاوین، عطاالله؛ گلشن، محمد؛ روحانی، حامد؛ اسمعیلی، اباذر (۱۳۹۴) شبیه‌سازی رواناب و بار رسوب حوضه آبخیز هراز با بهره‌گیری از الگوی SWAT، **پژوهش‌های جغرافیای طبیعی تهران**، ۴۷، صص. ۲۱۱-۱۹۷.
- گلشن، محمد؛ کاوین، عطاالله؛ روحانی، حامد؛ اسمعیلی، اباذر (۱۳۹۴) واسنجی چند ایستگاهی رواناب حوضه آبخیز هراز با مدل SWAT، **تحقیقات آب‌و خاک ایران**، ۴۶ (۲)، صص. ۳۰۳-۲۹۳.
- Abbaspour, K. C., Vejdani, M., Haghghat, S. (2007) SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT, **International Congress on Modeling and Simulation: Land, Water and Environmental Management**, Christchurch, New Zealand.
- Beven, K. (2001) How far Can We Go in Distributed Hydrological Modeling?, **Hydrology**, Earth System Science, 5, pp. 1-12.
- Binaman, J., Shoemaker, C. A. (2005) An Analysis of High-Flow Sediment Event Data for Evaluating Model Performance, **Hydrological Processes**, 19, pp. 605-620.
- Ficklin, D. L., Stewart, I. T., Maurer, E. P. (2013) Effects of Projected Climate Change on the Hydrology in the Mono Lake Basin, **Journal California Climatic Change**, 116 (1), pp. 111-131.
- Gassman, P. W., Reyes, M., Green, C. H., Arnold, J. G. (2007) The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Directions, **Transactions of the ASABE**, 50 (4), pp. 1212-1250.
- Gotzinger, J., Bgrdossy, A. (2007) Comparison of Four Regionalization Methods for a Distributed Hydrological Model, **Hydrology**, 333, pp. 374-384.
- Hwa, K., Pachepsky, Y. A., Ha, J., Kim, J., Park, M., (2012) The Modified SWAT Model for Predicting Fecal Coliforms in the Wachusett Reservoir Watershed, **Water Research**, 46 (15), pp. 4750-4760.
- Karlsson, I. B., Sonnenborg, T. O., Refsgaard, J. C., Trolle, D., Børgesen, C. D., Olesen, J. E., Jensen, K. H. (2016) Combined Effects of Climate Models, Hydrological Model Structures and Land Use Scenarios on Hydrological Impacts of Climate Change. **Hydrology**, 535, pp. 301-317.
- Khoi, D. N., Suetsugi, T. (2014) Impact of Climate and Land-Use Changes on Hydrological Processes and Sediment Yield-A Case Study of the Be River Catchment, Vietnam, **Hydrological Sciences**. 59 (5), pp. 1095-1108.
- Kirchner, J. W. (2012) Getting the Right Answers for the Right Reasons: Linking Measurements, Analyses, and Models to Advance the Science of Hydrology, **Water Resources Researches**, 42, pp. 1-5.
- Lerat, J., Andréassian, V., Perrin, C., Vaze, J., Perraud, J. M., Ribstein, P., Loumagne, C. (2012) Do Internal flow Measurements Improve the Calibration of Rainfall-Runoff Models?, **Water Resource Research**, 48 (2), pp. 1-18.
- Li, T., Gao, Y. (2015) Runoff and Sediment Yield Variations in Response to Precipitation Changes: A Case Study of Xichuan Watershed in the Loess plateau, China, **Water**, 7 (10), pp. 5638-5656.
- Li, Z, Liu, W. Z., Zhang, X. C., Zheng, F. (2009) Impact of Land Use Change and Climate Variability on Hydrology in an Agricultural Catchment on the Loess Plateau of China, **Hydrology**, 377, pp 35-42.
- Liu, J., Yuan, D., Zhang, L., Zou, X., Song, X. (2016) Comparison of Three Statistical Downscaling Methods and Ensemble Downscaling Method Based on Bayesian Model Averaging, China, **Advances in Meteorology**, 1 (1), pp. 1-12.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2005) **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation**, Soil & Water Research Laboratory, Agricultural Research

- Service, and Blackland Agricultural Research Station, Temple, Texas.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kinty, J. R., Williams, J. R. (2011) **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation**, College Station: Texas Water Resources Institute, Technical Report no 406.
- Panhalkar, S. S. (2014) Hydrological Modeling Using SWAT Model and Geoinformatic Techniques, Egypt, **Remote Sensing and Space Science**, 17 (2), pp. 197-207.
- Pechlivanidis, I. G., McIntyre, N. R., Wheeler, H. S. (2011) Calibration of the Semi-Distributed PDM Rainfall-Runoff Model in the Upper Lee Catchment, UK, **Hydrology**, 386 (1-4), pp. 198-209.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. (2001) Validation of the SWAT Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources, **The American Water Resources Association**, 37 (5), pp. 1169-1188.
- Setegn, S. G., Dargahi, B., Srinivasan, R., Melesse, A. M. (2010) Modeling of Sediment Yield from Anjeni-Gauged Watershed, Ethiopia Using SWAT Model, **American Water Resources Association**, 46 (3), pp. 514-526.
- Thampi, S. G., Raneesh, K. Y., Surya, T. V. (2010) Influence of Scale on SWAT Model Calibration for Stream flow in a River Basin in the Humid Tropics, **Water Resources Management**, 24 (15), pp. 4567-4578.
- Wang, S., Zhang, Z., Sun, G., Strauss, P., Guo, J., Tang, Y., Yao, A. (2012) Multi-Site Calibration, Validation, Sensitivity Analysis of the MIKE SHE Model for a Large Watershed in China, **Hydrology Earth System Sciences**, 16, pp. 4621-4632.
- Wei, X. H., Liu, W. F., Zhou, P. C. (2013) Quantifying the Relative Contributions of Forest Change and Climatic Variability to Hydrology in Large Watersheds: A Critical Review of Research Methods, **Water**, 5 (2), pp. 728-746.
- Yang, J., Reicher, P., Abbaspour, K. C., Xia, J., Yang, H. (2008) Comparing Uncertainty Analysis Techniques for a SWAT Application to the Chao he Basin in China. **Hydrology**, 358 (1-2), pp. 1-23.
- Yen, H., White, M. J., Jeong, J., Arnold, J. G. (2015) Evaluation of Alternative Surface Runoff Accounting Procedures Using the SWAT Model, **International Journal Agriculture and Biology Engineering**, 8 (1), pp. 1-15.
- Zuo, D., Xu, Z., Zhao, J., Abbaspour, C., Yang, H. (2015) Response of Runoff to Climate Change in the Wei River Basin, China, **Hydrological Sciences**, 60 (3), pp. 508-522.

