کاربرد مدل بارش–رواناب SWAT در شبیه‌سازی دبی روزانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه

فاطمه رشید[۱]، مسعود انتظاری[۲]

۱- کارشناس آب و و سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مهندسی مشاور طوس‌آب، مشهد

۲- مدیرگروه برنامه ریزی منابع آب و خاک، مرکز پژوهشی مدیریت منابع محیط زیست ارم

مدیرگروه مطالعات پایه منابع آب شرکت مهندسی مشاور طوس‌آب، مشهد

f.rashid@aut.ac.ir

خلاصه

سیل یک بلای طبیعی است که می تواند پیامدهای مخرب زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی در مناطق سیل خیز داشته باشد. در طول سال‌ها، مجموعه‌ای از اقدامات مدیریت سیل و سیستم‌های هشدار اولیه برای کاهش این اثرات توسعه یافته‌اند که در بسیاری از موارد در نظارت بر سیل و نجات جان و مال شهروندان موفق بوده‌اند. این سیستم‌ها برای پیش‌بینی دقیق پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و شبیه‌سازی رواناب به مدل‌های هیدرولوژیکی بارش–رواناب تکیه می‌کنند. مدل SWAT یکی از جامع‌ترین مدل‌های مفهومی نیمه توزیعی تبدیل بارش به رواناب در سطح حوضه‌های آبریز کلان و پیچیده بشمار می‌رود. هدف پژوهش حاضر ارزیابی کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه‌ها در حوزه‌های آبخیز بزرگ ایران، به منظور پایه‌گذاری یک سیستم یکپارچه پیش‌بینی سیلاب در کشور بود. بنابراین، با استفاده از مجموعه داده‌های آب‌وهوای شبکه‌بندی شده، مدل هیدرولوژیکی حوزه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از SWAT ساخته شد و نتایج بر اساس داده‌های ورودی ایستگاه هیدرومتری زمینی کالیبره و اعتبارسنجی شد. براساس نتایج حاصل، تطابق قابل قبول بین جریان اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی شده نشان داد که SWAT یک مدل بارش–رواناب قابل اعتماد است که درک جامعی از فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبریز با مقیاس بزرگ ارائه می‌دهد و می توان از آن به عنوان مدل پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه استفاده کرد.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی سیل، شبیه‌سازی بارش–رواناب، مدل SWAT.

۱. مقدمه

سیل به عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی با تاثیرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی به‌شمار می‌آید. طبق مطالعات صورت گرفته، امروزه حدود ۴۰ درصد خسارات ناشی از بلایای طبیعی ناشی از وقوع سیلاب‌ها است. توسعه شهرسازی و تجمع سرمایه‌ها در سیلاب‌دشت‌ها، کاهش ظرفیت نگهداشت آب در خاک به علت تغییر کاربری اراضی و برهم زدن مورفولوژی طبیعی حوضه‌های آبریز از جمله عوامل اصلی تشدید اثرات مخرب سیل‌ها هستند. از طرفی تغییر اقلیم و گرمایش کره زمین منجر به تغییر بیلان تابش از سطح زمین، گردش اتمسفر، تغییر توزیع مکانی و زمانی و شدت بارش شده است [۱]. این تغییرات از یک سو و افزایش جمعیت و توسعه شهرها در دشت‌های سیلابی از سوی دیگر موجب افزایش ریسک سیلاب در دهه‌های آتی خواهند شد.

ایران، کشوری با اقلیم شرایط خشک و نیمه خشک، در قرون گذشته و کنونی در معرض سیل‌های شدید و دوره‌های خشکسالی‌های متعدد بوده است. یکی از شدیدترین سیل‌های ایران در ماه‌های مارس تا آوریل ۲۰۱۹ رخ داد که بر اثر بارش شدید باران رخ داد که منجر به وقوع سیل‌های فاجعه‌بار در ۳۱ استان شد. دفتر هماهنگی امور بشردوستانه سازمان ملل از طغیان تقریباً ۱۴۰ رودخانه خبر داد که بیشترین خسارات را به استان‌های گلستان، ایلام، لرستان و خوزستان وارد کرد. شکستن دروازه سیل در استان گلستان منجر به آبگرفتگی شهر آق قلا شد و حدود ۷۰۰ خانوار مجبور به تخلیه منازل خود شدند. این فاجعه ۱۰ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار داد، ۲ میلیون نفر به کمک های بشردوستانه نیازمند شده و بیش از نیم میلیون نفر از خانه‌های خود آواره شدند. سیل خسارت قابل توجهی به مناطق کشاورزی وارد کرد و یک میلیون هکتار از زمین های کشاورزی زیر آب رفت. تأسیسات زیربنایی از جمله ۷۰۰ پل، جاده، مدرسه و بیمارستان تخریب شده یا آسیب دیدند. مجموع خسارات مالی وارده حدود ۸ میلیارد دلار برآورد شد. این سیل همچنین منجر به کشته شدن دست کم ۷۸ نفر و مجروح شدن بیش از ۱۱۳۷ نفر گشت.

بارش‌ها های حدی بهار ۱۳۹۸ و سیل ناشی از آن هشداری بود که لزوم انجام یک بازخوانی جامع در طرح‌ها و اقدامات پیشین در مدیریت حوضه‌های آبخیز و کنترل سیل را آشکار ساخت تا در جریان این بازخوانی نقاط ضعف شناسایی و اصلاح گردد. امروزه روش‌های مدیریت سیل طیف گسترده‌ای از اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای را شامل می‌شود که مدل‌ها و سیستم‌های هشدار سیل به دلیل هزینه پایین، کارایی بالا، سازگاری با محیط زیست و سهولت بهره‌برداری به عنوان یکی از موثرترین روش‌های غیرسازه‌ای در کشورهای مختلف دنیا مورداستفاده قرار می‌گیرد. پیش‌نیاز یک سیستم مدیریت جامع سیل که مبتنی بر رویکرد مدیریت ریسک سیلاب و کاهش آسیب‌پذیری باشد، ایجاد و استقرار سیستم پیش‌بینی بارش و مدیریت سیلاب است. یکی از پایه‌های اساسی مدیریت سیل در حوضه آبریز، پیش‌بینی به هنگامِ آن می‌باشد. در واقع پیشبینی سیلاب یک مرحله بالاتر از سیستم‌های هشدار سیل قرار دارد، چراکه در آن، در بازه‌های زمانی مختلف شش ماه، فصلی، ماهانه، هفتگی و روزانه (البته با دقت‌ها و عدم قطعیت‌های مختلف) با پیش‌بینی شرایط آب و هوایی، تبدیل بارش به رواناب با کمک مدل‌های هیدرولوژی و در نهایت تعیین پهنه گسترش سیلاب با کمک مدل‌های هیدرولیکی، می‌توان احتمال وقوع سیل را در حوضه آبریز بررسی نمود. چنین سیستم‌هایی در هر سه بازه زمانی «پیشاسیلاب»، «رویداد سیل» و «پساسیلاب» کارایی کلیدی دارند [۲].

مدل‌های هیدرولوژی از جمله مدل‌های بارش-رواناب یکی از روش‌های تخمین رواناب و مطالعه پدیده‌های هیدرولوژیکی در حوضه آبریز هستند. از زمان پیدایش این مدل‌ها، مدل‌های هیدرولوژی متعددی توسعه یافته اند که براساس نوع روش گسسته‌سازی مکانی، می‌توان آن‌ها را به دو گروه مدل‌های یکپارچه[۱] و مدل‌های توزیعی[۲] (نیمه توزیعی[۳]) تقسیم‌بندی کرد [۳]. سادگی ساختار مدل، هزینه محاسباتی پایین و نیاز به داده‌های اولیه کمتر نسبت به مدل‌های توزیعی، از عواملی هستند که موجب شده است مدل‌های یکپارچه در شبیه‌سازی رواناب کاربرد بیشتری داشته باشند. اما، از آنجایی که این مدل‌ها ناهمگنی حوضه آبریز را در شبیه‌سازی درنظر نمی‌گیرند، استفاده از آن‌ها در حوضه‌های پیچیده امکان‌پذیر نیست. این در حالی است که مدل‌های توزیعی (نیمه توزیعی) حوضه آبریز را به تعدادی زیرحوضه همگن کوچکتر با مشخصه‌های متفاوت تقسیم می‌کنند. بنابراین، این دسته مدل‌ها تغییرات مشخصه‌های مکانی حوضه از جمله پوشش گیاهی، مشخصات خاک و هواشناسی را در مدلسازی اعمال می‌کنند که این امر دقت شبیه‌سازی را به مراتب افزایش می‌دهد [۴]. مدل SWAT[۴] یک مدل هیدرولوژی نیمه توزیعی برای مطالعات آب و خاک حوضه آبریز است که در سال ۱۹۹۰ توسط جف آرنولد[۵] برای سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا تهیه شد [۵]. مدل SWAT قابلیت اتصال به سیستم اطلاعات جغرافیایی[۶] را داشته و می‌تواند در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های کلان و پیچیده بکار رود. جایاکریشنان و همکاران [۶] کاربرد دادهای بارش راداری در مدلسازی هیدرولوژی توزیعی و پتانسیل مدل SWAT در برآورد رواناب روزانه و آنالیز و پیش‌بینی سیل را در حوضه آبریز ساندو در کشور کنیا بررسی کردند. کائو و همکاران [۷] در مطالعه خود برای مدلسازی رواناب روزانه یک حوضه آبریز به مساحت ۲۰۷۵ کیلومترمربع، به ضرایب نش-ساتکلیف ۰/۷۸ و ۰/۷۲ به ترتیب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل رسیدند. عباسپور و همکاران [۸] توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیندهای موثر بر کیفیت آب، رسوب و حمل مواد مغذی را در حوضه رودخانه تور در کشور سوئیس با مساحت ۱۷۰۰ کیلومتر مربع مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج حاصل برای رواناب روزانه، نیترات، غلظت رسوب و کل فسفر همخوانی بسیار خوبی با مقادیر مشاهده‌ای داشتند. میشرا و همکاران [۹] با استفاده از مدل SWAT رواناب و بار رسوب روزانه و ماهانه را در یک حوضه آبریز با مساحت ۱۷ کیلومترمربع در کشور هند شبیه‌سازی کردند. رستمیان [۱۰] با استفاده از مدل SWAT مقادیر رواناب و بار رسوب حوضه بهشت‌آباد واقع در کارون شمالی را مدلسازی کردند. طبق نتایج حاصل مدل توانست دبی پایه رودخانه را به خوبی تخمین بزند اما، در محاسبه دبی‌های اوج سیلاب عملکرد مطلوبی نداشت. دو و همکاران [۱۱] از مدل SWAT برای پیش‌بینی رواناب روزانه حوضه‌ای به مساحت ۲۷۶ کیلومترمربع استفاده کردند و ضریب راندمان نش-ساتکلیف و میانگین خطای نسبی برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۶ و ۱۵٪ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۵۶ و ۴٪ بدست آوردند. تامپی و همکاران [۱۲] تاثیر مقیاس منطقه‌ای حوضه را بر شبیه‌سازی رواناب سالانه با استفاده از مدل SWAT بررسی کردند که مدل توانست عملکرد قابل قبولی در پیش‌بینی رواناب در هر دو مقیاس حوضه از خود نشان دهد؛ اگرچه، با افزایش اندازه حوضه عدم‌قطعیت مدل افزایش یافت و مقادیر رواناب در کل بازه شبیه‌سازی کمتر از مقادیر واقعی بدست آمد. احمدزاده و همکاران [۱۳] از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی حوضه آبریز آجی چای استفاده نمودند. نتایج حاصل نشان دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی رواناب طی دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی داشت. همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد با وجود افزایش سطح زیرکشت آبی در حوضه آبریز آجیچای و افزایش دمای حداقل و دمای حداکثر و درنتیجه افزایش تبخیروتعرق پتانسیل در این حوضه آبریز، به دلیل روند کاهشی بارندگی (کاهش میزان موجودیت آب)، میزان تبخیر و تعرق واقعی کل حوضه آجیچای نزولی داشته و مقدار آن کاهش یافته است.

---

[۱] lumped
[۲] distributed
[۳] Semi-distributed
[4] The Soil and Water Assessment Tool
[5] Jeff Arnold
[6] Geographic Information System (GIS)

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی پتانسیل مدل SWAT به عنوان یک مدل بارش-رواناب در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیک حوضه آبریز دریاچه ارومیه از نظر برآورد دبی روزانه رودخانه‌های این حوضه از سال آبی ۹۳-۱۳۹۴ تا پایان سال آبی ۹۷-۱۳۹۸ است.

۲. مواد و روش‌ها

۲,۱ منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی کشور است. این حوضه بین استان‌های آذربایجان غربی (۴۶٪)، آذربایجان شرقی (۴۳٪) و کردستان (۱۱٪) قرار دارد. دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان به شمار می‌آید. اکوسیستم این دریاچه نمونه‌ای شاخص از یک حوضه آبریز بسته است که کلیه رواناب‌های جاری در رودخانه‌های حوضه به آن تخلیه می‌گردد. همچنین اکوسیستم فعال آن شامل دریاچه و حوضه آبریز آن است. در نتیجه مرز حوضه آبریز دریاچه ارومیه، مرز دقیقی را برای مدیریت عوامل مؤثر بر دریاچه و زیستگاه‌های مهم در حوضه به‌وجود آورده است. این حوضه شامل سه استان آذربایجان‌غربی، آذربایجان‌شرقی و کردستان می‌باشد که، آذربایجان‌غربی با درصد مساحت نزدیک ۴۸ درصد بیشترین سطح از این حوضه را به خود اختصاص داده است. همچنین در سطح این حوضه، تعداد ۲۵ محدوده مطالعاتی قرار دارد.

رودخانه‌های این حوضه آبریز بسته به منابع تأمین کنندهٔ آب آن‌ها در شرق و غرب دریاچه به دو صورت مختلف دیده می‌شوند. رودخانه‌های شرق و جنوب شرق دریاچهٔ کم از منابع پر آب مانند ارتفاعات سهند و سبلان و چهل چشمه کردستان نشأت می‌گیرند و دارای مسیری طولانی‌تری هستند و رودخانه‌های دائمی می‌باشند. تلخه رود، زرینه رود، سیمینه رود، صوفی چای. رودخانه‌های غربی، جنوب غربی و شمال دریاچه که دارای مسافتی کوتاهتر و آب کمتری می‌باشند. گدار چای، نازلو چای، زولا چای. آب و هوای حوضهٔ آبریز دریاچهٔ خزر غالباً تحت تأثیر ارتفاعات آن می‌باشد. این حوضه دارای آب و هوایی نیمه خشک قاره‌ای و رژیم بارندگی مدیترانه‌ای رژیم اقلیمی غالب حوضه است. متوسط بارش سالانه حوضه ۳۹۸ میلی‌متر می‌باشد، پر باران‌ترین فصل سال زمستان و اوایل بهار است بطوری‌که حدود ۷۵ درصد از حجم کل بارندگی‌ها در ماه‌های دی تا اردیبهشت اتفاق می‌افتد. رژیم رودخانه‌های ناشی از بارندگی و ذوب برف‌هاست. دما در این حوضه بین صفر تا ۲۰ درجه زیر صفر در زمستان و تا ۴۰ درجه در تابستان تغییر می‌کند. شکل ۱ موقعیت حوضه موردمطالعه را نشان می‌دهد. حوضه آبریز دریاچه ارومیه دربرگیرنده ۲۳ سد در دست بهره‌برداری، ۱۰ سد اجرایی و ۴۱ سد مطالعاتی می‌باشد که سدهای بکان، مهاباد، زولا و شهرچای از بزرگترین سدهای بهره‌برداری حوضه هستند.

شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۲,۲ معرفی مدل SWAT

مدل SWAT قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی اصلی شامل تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، ذوب برف، نفوذ سطحی، نفوذ عمقی، جریان آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی را دارد. این مدل، حوضه آبریز را به تعدادی زیرحوضه و هر زیرحوضه را به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی[1] یا HRU

[1] Hydrologic Response Unit

تقسیم‌بندی می‌کند. هر HRU ترکیب منحصر به فردی از لایه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و گروه خاک است. به طور کلی، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در یک حوضه توسط مدل SWAT به دو بخش اصلی تقسیم می‌گردد [۱۴]. چرخه هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT بر اساس معادله بیلان آب به شکل زیر است:

$$SW_t = SW_0 + \sum\left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \quad (۱)$$

در این رابطه، SW_t محتوای آب نهایی در خاک (میلیمتر)، SW_0 مقدار آب اولیه موجود در خاک (میلیمتر)، t زمان (روز)، R_{day} مقدار بارندگی روزانه (میلیمتر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی روزانه (میلیمتر)، E_a مقدار تبخیر و تعرق روزانه (میلیمتر)، W_{seep} مقدار آب نفوذی به مناطق قشری در پروفیل خاک در روز (میلیمتر) و Q_{gw} مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی در روز (میلیمتر) است. در مدل SWAT برای هر واحد هیدرولوژیکی حجم رواناب و دبی حداکثر با وارد کردن مقادیر بارندگی محاسبه می‌شود. حجم رواناب سطحی از دو روش شماره منحنی SCS (CN) و معادله نفوذ گرین-آمپت[1] تخمین زده می‌شود. در مطالعه حاضر از روش SCS برای برآورد رواناب استفاده شد. روش SCS یک مدل تجربی است که در آن مقدار رواناب رابطه‌ای غیرخطی با میزان رطوبت خاک دارد، به طوری که با نزدیک شدن رطوبت خاک به حد اشباع، شماره منحنی به ۱۰۰ نزدیک می‌شود.

$$Q_{surf} = \frac{\left(R_{day} - I_a\right)^2}{R_{day} - I_a + S} \quad (۲)$$

در این رابطه، Q_{surf} ارتفاع رواناب (میلیمتر)، R_{day} ارتفاع بارش در روز موردنظر (میلیمتر)، I_a جذب اولیه شامل ذخیره سطحی، ذخیره لاشبرگ، نفوذ قبل از شروع رواناب (میلیمتر) و S عامل نگهداشت (میلیمتر) است. S تابعی از خصوصیات خاک، کاربری اراضی، مدیریت و شیب زمین و محتوای آب قابل‌دسترس خاک است و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = 25.4\left[\frac{1000}{CN} - 10\right] \quad (۳)$$

در این رابطه، CN عدد شماره منحنی و تابعی از نفوذپذیری خاک، کاربری اراضی و شرایط رطوبت خاک و بسته به پوشش‌های مختلف زمین و انواع خاک‌ها تغییر می‌کند. اغلب مقدار نگهداشت اولیه I_a برابر با S۲ ۰/ در نظر گرفته می‌شود. در این روش، رواناب زمانی اتفاق می‌افتد که $R_{day} > I_a$ برقرار باشد.

۲,۳. آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی

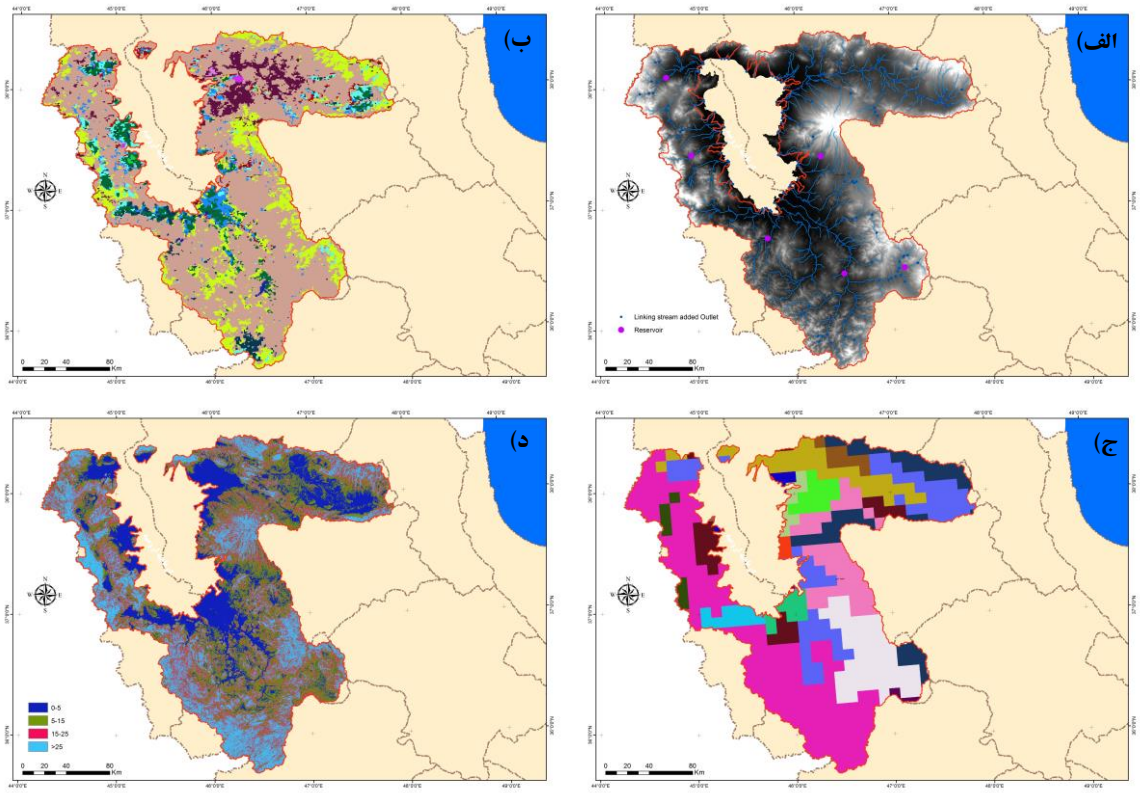
داده‌های مورداستفاده در مدل SWAT شامل داده‌های مکانی و داده‌های عددی و هیدروکلیماتولوژی است. داده‌های مکانی شامل سه نقشه رستری مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی و نقشه خاک‌شناسی به عنوان نقشه‌های پایه ورودی برای ساخت HRU می‌شود. (شکل ۲) با داشتن نقشه توپوگرافی منطقه، مدل رقومی ارتفاع با اندازه سلول ۳۰ متر تهیه شد و با استفاده از این منطقه، نقشه شیب در پنج طبقه شیب کمتر از ۵، ۵-۱۵، ۱۵-۲۵، و بیشتر از ۲۵ درصد بدست آمد. نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی از نقشه کاربری اراضی جهانی[2] (GLCC) سایت زمین شناسی آمریکا[3] (USGS) تهیه شد. نقشه خاک‌شناسی منطقه از نقشه خاک‌شناسی جهانی سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد[4] (FAO) که شامل اطلاعات پارامترهای خاک برای ۵۰۰۰ نوع خاک در سطح جهان است، بدست آمد. در تحقیق حاضر، داده‌های اقلیمی شامل بارش و دمای حداکثر و حداقل روزانه به عنوان داده‌های هواشناسی ورودی و اطلاعات مربوط به مشخصات مخازن به همراه اطلاعات دبی روزانه خروجی از سد و مصارف ماهانه به مدل SWAT معرفی شدند.

بارش نقش کلیدی در چرخه جوی و هیدرولوژیکی ایفا می‌کند و داده‌های بارش قابل اعتماد برای تحقیقات در زمینه مدلسازی هیدرولوژیکی بسیار مهم است. با توجه به محدودیت‌های مختلف ایستگاه‌های هواشناسی زمینی، استفاده از بارش اندازه‌گیری شده از سنجنده‌های هواشناسی اغلب نمی‌تواند الزامات تحقیقات را برآورده کند و برای کاربرد در سیستم‌های هشدار اولیه نامناسب است. محدودیت های ابزاری، به ویژه در مناطق کوهستانی و دورافتاده، توزیع کم تراکم و پراکنده ایستگاه‌های زمینی در مناطق وسیع، و ناتوانی در نمایش تغییرات مکانی در بارش، برخی از چالش‌های بکارگیری داده‌های بارش اندازه‌گیری شده است. برعکس، داده‌های ماهواره‌ای در پوشش وسیع تولید می‌شوند و وضوح مکانی و زمانی بالایی دارند. برخی از

[1] Green-Ampt
[2] Global Land Cover Characterization
[3] The United States Geological Survey
[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations

متداول‌ترین محصولات بارش ماهواره‌ای استفاده شده عبارتند از: Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA), Climate Prediction Center (CPC) morphing technique (CMORPH), Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP), and the Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) mission (IMERG). یکی از جدیدترین محصولاتی است که مزایای بسیاری از الگوریتم‌های قبلی را ترکیب می کند و در نتیجه توجه زیادی را در زمینه سنجش از دور ماهواره‌ای بارش به خود جلب می کند. الگوریتم IMERG بارندگی را با وضوح نیم ساعت و ۰٫۱ درجه × ۰٫۱ درجه از مارس ۲۰۱۴ تولید می کند.

در مطالعه حاضر، داده های آب و هوایی، رکوردهای ۳۰۵۵۸ نقطه بارش GPM در یک دوره هفت ساله از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. همچنین، از نسخه ArcSWAT 2012.10_3.19 قابل اجرا روی ArcGIS 10.3.1 برای مدلسازی استفاده شد. پس از معرفی نقشه DEM و ایستگاه‌های آبسنجی به نرم‌افزار، مدل بر اساس این نقشه تمامی اطلاعات فیزیوگرافی موردنیاز را استخراج کرد، شبکه آبراهه‌ها را ترسیم نمود و با درنظر گرفتن ایستگاه‌های آبسنجی به عنوان خروجی هر زیرحوضه، تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها را انجام داد. بدین ترتیب، با توجه به وسعت حوضه موردمطالعه و با هدف کنترل هیدروگراف تمامی ایستگاه‌های آبسنجی، تعداد ۱۵۵ زیرحوضه برای حوضه آبریز ترسیم شد و خصوصیات فیزیکی آن‌ها محاسبه گشت. با داشتن سه نقشه رستری خصوصات خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب، ۱۱۲۰ واحدهای پاسخ هیدرولوژی برای مدل تعریف شدند. شکل ۲ نقشه شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها به همراه محل سدها، نقشه خاک‌شناسی، کاربری اراضی و طبقات شیب را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی این حوضه آبریز در مقیاس روزانه برای سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ صورت گرفت.



شکل ۲- الف) نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، رودخانه‌ها و موقعیت سدهای مورد شبیه‌سازی ؛ ب) نقشه کاربری اراضی و پوشش گیاهی؛ ج) نقشه خاک‌شناسی ؛ د) نقشه طبقات شیب.

۳. واسنجی مدل SWAT

مدل‌های هیدرولوژی دارای پارامترهای متعددی هستند که مقادیر بهینه آنها به شرایط منطقه و داده‌های ورودی بستگی دارد و تنها با داشتن این مقادیر بهینه می‌توان شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژی را با دقت قابل‌قبول انجام داد. واسنجی شامل تصحیح پارامترهای تاثیرگذار مدل در جهت کاهش اختلاف

بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های مشاهداتی است. به منظور بهبود کیفیت واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت، ضریب نش- ساتکلیف (NS)[1] و ضریب تعیین (R^2) به عنوان توابع هدف کالیبراسیون معرفی شدند. بدین ترتیب، واسنجی مدل تا رسیدن مقادیر هر تابع هدف به مقدار بهینه ادامه خواهد داشت. تابع هدف NS توسط بسیاری از هیدرولوژیست‌ها در مدلسازی حوضه آبریز استفاده شده و کاربرد آن برای مقایسه هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی نسبت به سایر توابع هدف بیشتر توصیه شده است [۱۵]. اگر شاخص NS بیش از ۰/۷۵ باشد، عملکرد مدل عالی، اگر NS بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، عملکرد مدل رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، عملکرد مدل غیرقابل‌قبول درنظر گرفته می‌شود [۱۶]. ضریب تعیین یا همبستگی نشان‌دهنده نسبت پراکندگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی است که بین صفر و یک تغییر می‌کند. این دو ضریب به ترتیب از دو رابطه (۶) و (۷) تعیین می‌شوند:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[(Q_m - Q_s)_i]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{m,i} - \overline{Q_m}\right)^2} \quad (۶)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Q_{m.i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{m.i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(Q_{s.i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (۷)$$

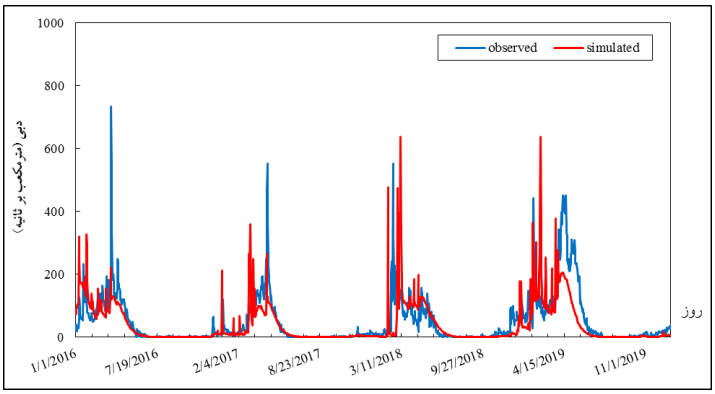
در این روابط، n تعداد مشاهدات، Q_m و Q_s به ترتیب مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده، $\bar{Q}_m$ و $\bar{Q}_s$ به ترتیب میانگین مقادیر رواناب اندازه‌گیری و برآورد شده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

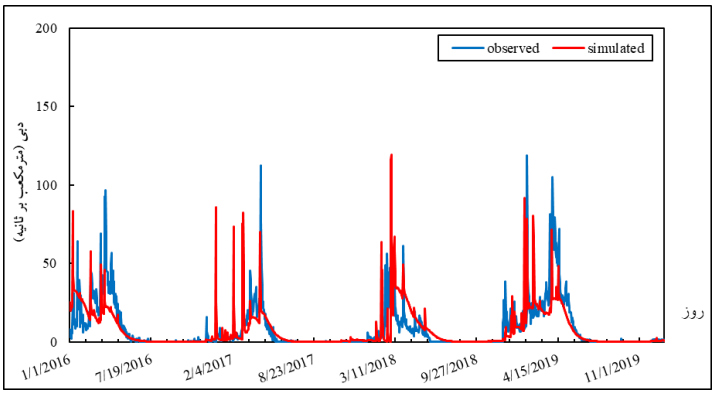
نتایج شبیه‌سازی رواناب روزانه رودخانه در مرحله واسنجی در سه ایستگاه ورودی سدهای بوکان، مهاباد و زولا در شکل‌های ۳ تا ۵ آمده است. همانطور که در شکل مشخص است، مدل توانسته دبی پایه رودخانه و دبی پیک سیلاب‌های رخ داده در بازه شبیه‌سازی را در اکثر ایستگاه‌ها با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند. نکته قابل‌توجه این است که پیش‌بینی رواناب در سیل سال ۱۳۹۸ با دقت قابل قبولی صورت گرفته است. در بازه‌های زمانی که دبی رودخانه در حد جریان پایه یا کمتر از آن است، دقت شبیه‌سازی کمتر از بازه‌های سیلابی است که علت آن می‌تواند درنظر نگرفتن اطلاعات مربوط به برداشت و مصارف آب از رودخانه باشد. با اعمال این داده‌ها شبیه‌سازی جریان پایه بهتر صورت خواهد گرفت؛ ولی به طور کلی، می‌توان ادعا کرد مدل در برآورد مقادیر کم جریان در دوره‌های خشکسالی و تغییراقلیم عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دوره‌های ترسالی از خود نشان می‌دهد. علت این امر ساده‌سازی مدل در شبیه‌سازی تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در مواقع بارندگی با ارتفاع کم است [۱۷]. یکی از نقاط ضعف مدل SWAT شبیه‌سازی ضعیف ذوب برف در مناطق کوهستانی است. این مسئله روی هیدروگراف رواناب در بازه زمانی اواخر زمستان و اوایل بهار تاثیر می‌گذارد و موجب می‌شود دبی حداکثر کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شود. یکی از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی ذوب برف استفاده از روش SCS در محاسبه رواناب است. طبق مطالعات صورت گرفته، این روش نمی‌تواند رواناب حاصل از ذوب برف را به خوبی تخمین بزند. به علاوه، فرضیه‌های مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ زده و اشباع منجر به بروز ناهماهنگی در هیدروگراف خروجی می‌شود. در بعضی ایستگاه‌ها مدل نتوانسته است تعدادی تک رخداد را پیش‌بینی کند که علت اصلی آن می‌تواند عدم ثبت داده بارش رگباری در ایستگاه بارانسجی باشد.

در این تحقیق، مدل SWAT توانست رواناب روزانه حوضه آبریز گرگانرود-قره‌سو را به صورت رضایت بخشی شبیه‌سازی کرده و تغییرات مکانی و زمانی جریان روزانه رودخانه در حوضه را به خصوص در سیل سال ۱۳۹۸ با دقت بالایی پیش‌بینی نماید. از علل اختلاف نتایج مدلسازی با مقادیر مشاهداتی می‌توان به عواملی همچون شبیه‌سازی ضعیف ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی، کم بودن جریان در بعضی دوره‌های زمانی، فرضیه‌های انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع، کمبود تعداد و عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی و کلیماتولوژی در حوضه، خطای ثبت داده‌های هواشناسی و آبسنجی و عواملی از این دست اشاره کرد. برای بهبود نتایج می‌توان از نقشه‌های کاربری اراضی و خاک‌شناسی با دقت بالاتری استفاده کرد. همچنین، در صورت اعمال اطلاعات مربوط به برداشت و مصارف آب از رودخانه‌های موجود شبیه‌سازی جریان پایه رودخانه دقیق‌تر صورت خواهد گرفت. از عملکرد کلی مدل می‌توان نتیجه گرفت نرم‌افزار SWAT ابزاری مناسب جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه آبریز بوده و قابلیت استفاده به عنوان مدل هیدرولوژی سیستم پیش‌بینی و هشدار سیل را داراست.

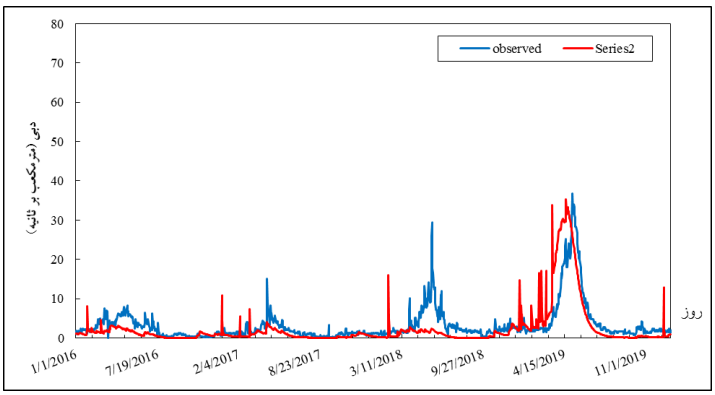
[1] Nash-Sutcliffe



شکل ۳- مقادیر دبی روزانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده – ایستگاه ورودی سد مهاباد



شکل ۴- مقادیر دبی روزانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده – ایستگاه ورودی سد بوکان



شکل ۵- مقادیر دبی روزانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده – ایستگاه ورودی سد زولا

۵. مراجع

[1] Adams III T. E., Pagano T. C. Flood forecasting: A global perspective. Academic Press, Boston, USA, 2016.

[2] Maidment D. R. Handbook of hydrology. Earth-Sci. Rev., 24:227–229, 1994.

[3] Dan Y., Ping X., Dong X., Hu X., Li Y., Peng T., Ma H., Wang K., Xu S. Improvement of the SWAT model for event-based flood simulation on a sub-daily timescale. Journal of Hydrology Earth Science, 22:5001-5019, 2018.

[4] Arnold J., Srinivasan R., Muttiah R. S., Williams J. R.: Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. JAWRA, 34:91–101, 1998.

[5] Jayakrishnan R., Srinivasan R., Santhi C., Arnold J., Advances in the application of the SWAT model for water resources management. Journal of Hydrological Processes, 19:749-762, 2005.

[6] Cao W., Bowden B. W., Davie T. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. Journal of Hydrology Process, 20:1057–1073, 2006.

[7] Abbas pour K. C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., Zobrist J., Srinivasan R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology, 333:413-430, 2007.

[8] Mishra A., Kar S., Singh VP. Prioritizing structural management by quantifying the effect of land use and land cover on watershed runoff and sediment yield. Journal of Water Resources Management, 21:1899-1913, 2007.

[9] Rostamian R. Estimation of runoff and sedimentaion in Behesht Abad basin in Northern Karun watershed using SWAT 2000 Model. Master Dissertation. Industrial University of Esfahan. Agricuture faculty. Water engineering department, 2007. (In Persian)

[10] Du B., Ji X., Harmel R. D., Hauck L. M. Evaluation of a watershed model for estimating daily flow using limited flow measurements. Journal of the American Water Resources Association, 45(2):475-484, 2009.

[11] Thampi S., Raneesh K., Surya T. V. Influence of scale on SWAT model calibration for stream flow in a river basin in the humid tropics. Water Resources Management, 24(15):4567-4578, 2010.

[12] حجت احمدزاده، احمد فاخری فرد، محمدعلی قربانی، مسعود تجریشی. ارزیابی تاثیر توام تغییر متغیرهای اقلیمی و کاربری اراضی بر روند تبخیر و تعرق واقعی با استفاده از مدل SWAT در حوضه آجی چای. صلنامه علوم آب و خاک شماره ۳، دوره ۲۶. ۱۴۰۱

[13] Neitsch S., Arnold J., Kiniry R., Williams R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2009 TWRITR-191" Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, 2011.

[14] Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., Kløve B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, 524:733-752, 2015.

[15] ASCE. Criteria for evaluation of watershed models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 119: 429-442. 1993

[16] Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models, part I- A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10:282–290, 1970.

[17] Hantush M. M., Kalin L. Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2. Hydrological Sciences Journal, 50(6):1151-1172, 2005.