اولین کنفرانس مهندسی فناوری اطلاعات مکانی
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۲۹ و ۳۰ دی ماه ۱۳۹۴

The 1st National Conference on Geospatial Information Technology
K.N.Toosi University of Technology
Faculty of Geomatics Engineering
19 - 20 January 2016

کاربرد سیستم اطلاعات مکانی و مدل ARCSWAT[1] در شبیه سازی رواناب سطحی

فریناز غلامی[1]، ،محمدرضا شمسایی فر[2]، علیرضا منصوری[3]

[1] کارشناس ارشد مهندسی عمران، مهندسی آب، شرکت آب و فاضلاب شهرها و شهرک های غرب تهران،
[2] سرپرست معاونت نظارت بر بهره برداری، شرکت آب و فاضلاب شهرها و شهرک های غرب تهران،
[3]مدیر دفتر مصرف و آب بدون درآمد، شرکت آب و فاضلاب شهرها و شهرک های غرب تهران،

چکیده :

حیات بشر، شاهد حوادث مختلف هیدرولوژیکی نظیر سیل، کمبود آب و خشکسالی، آلودگی های کیفی آب ، وقوع بهمن و غیره بوده است. که دامنه خطر آن‌ها تابع رفتار متغیرهای هیدرولوژیکی و خصوصیات حوزه های آبخیز است. در این رابطه مدل‌هایی هستند که قادرند رفتار و خصوصیات حوضه راتقلید نموده و مقادیر رواناب و سایر مولفه های بیلان حوزه را برآورد و یا شبیه‌سازی نمایند. یکی از مدل های هیدرولوژیکی مهم، مدل ارزیابی آب و خاک (ARC SWAT) است که یکی از الحاقیه های نصب شده بر روی نرم افزار ARC GIS می باشد. در تحقیق حاضر، شبیه سازی رواناب در بخشی از حوضه زرینه رود، با استفاده از این مدل و بر اساس داده های جمع آوری شده به صورت ماهانه انجام شد. واسنجی و اعتبار سنجی مدل با استفاده از برنامه SUFI2 به ترتیب برای سالهای ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ صورت پذیرفت. دقت شبیه سازی با استفاده از شاخص ارزیابی ناش-ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی برای دبی ماهانه به ترتیب ۰.۷۹ و ۰.۷۹ بدست آمد که کارایی مدل ARCSWAT را در برآورد رواناب با مطلوبیت نسبتاً خوبی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی : مدل ARCSWAT، رواناب، شاخص‌های ارزیابی نس- ساتکلیف

[1] -Soil and Water Assessment Tools

نویسنده مکاتبه کننده : فریناز غلامی
آدرس پستی :
تلفن :
آدرس پست الکترونیک :

۱- مقدمه

ایران سرزمینی است که، هرساله شاهد خسارات جبران‌ناپذیری ناشی از عدم کنترل آب‌های سطحی در بخش‌هایی از کشور می‌باشد. رواناب ناشی از بارندگی در حوضه‌های آبخیز، علاوه بر خسارات جانی و مالی ناشی از سیل، باعث فرسایش و از بین رفتن خاک حاصلخیز سطحی شده و رسوب‌گذاری در مسیل‌ها، رودخانه‌ها و مخازن سدها را به دنبال دارد. به‌منظور جلوگیری از خسارات ناشی از سیل روش‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای وجود دارد، که در اکثر کشورها، روش‌های سازه‌ای کنترل سیل به‌تنهایی جوابگوی مسائل و مشکلات سیل نبوده‌اند و به عبارتی دور کردن سیل از مردم به علت وقوع سیلاب‌های بزرگ‌راه گشا نشده است. در همین راستا برای شبیه‌سازی فرآیند رواناب و برآورد سیلاب، مدل‌های مختلفی توسعه‌یافته است. این مدل‌ها باید بتوانند حجم وسیعی از داده‌ها ازجمله: داده‌های بارش، توپوگرافی، مرزهای حوضه، خصوصیات خاک و لایه‌های زیرسطحی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، دستگاه‌های انتقال رواناب، سازه‌های مدیریتی موجود، داده‌های کیفی آب و سطح آب زیرزمینی را در شبیه‌سازی به کار برد[۱]. با استفاده از نتایج این مدل‌سازی‌ها می‌توان حرکت آب‌های سطحی و زیرسطحی را کنترل نمود. بنابراین استفاده از مدلی با جامعیت لازم در شبیه‌سازی حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر منجر به توسعه تعداد زیادی مدل‌های یکپارچه، نیمه توزیعی و توزیعی توسط محققان مختلف شده است [۲]. چالش بزرگ همه این مدل‌ها تولید هیدروگراف در حوضه‌های فاقد آمار است که مدل را به‌شدت به‌دقت اطلاعات برداشت‌شده از حوضه وابسته می‌نماید. مدل استفاده‌شده در این پژوهش، مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tool) می‌باشد که برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط دکتر جف آرنولد در سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری شد[۳]. مدل SWAT یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی در حوضه‌های آبریز پیچیده و وسیع با توجه به تغییرات خاک، کاربری اراضی و شرایط آب‌وهوایی در دوره‌های طولانی است.. قابل‌ذکر است این مدل امکان شبیه‌سازی داده‌های خروجی هیدرومتریک را برای مدت طولانی فراهم می‌سازد که ازنظر آماری اهمیت فراوان اقتصادی دارد. این مدل دارای یک الحاقیه تحت نرم‌افزارARCGIS به نامARC SWAT می‌باشد علت استفاده از این مدل خاص که مشخصات آن ارائه‌شده است، اهمیت بسیار زیاد پارامترهای فیزیوگرافی در ساختار مدل و لذا اطمینان به امکان مقایسه بهتر منابع مختلف رقومی ارتفاعی به‌عنوان داده ورودی بر عملکرد مدل می‌باشد. ازآنجاکه اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از پارامترها در مقیاس حوضه‌ای مشکل است و یا حتی امکان‌پذیر نمی‌باشد، لازم است مدل برای حوضه موردنظر واسنجی گردد. در این مطالعه از برنامه SUFI-2 برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد.در زمینه شبیه‌سازی و بررسی کارایی مدل SWAT تحقیقات زیادی انجام‌شده است که به‌عنوان نمونه به چند مورداشاره می‌شود.

شفرد و همکاران (۱۹۹۹) توانایی مدل SWAT را در شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی و کیفیت آب در یک حوضه کشاورزی در ناحیه‌ای از مریلند موردبررسی قراردادند. آن‌ها بزرگ‌مقیاس بودن، توزیعی بودن و هماهنگ بودن مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) را مزیت‌های این مدل معرفی کردند[۴].

عباسپور و همکاران (۲۰۰۷) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی حوضه رودخانه تور، در شمال شرقی سوئیس با مساحتی حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع، استفاده کردند. این مطالعه نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات و نتایج نسبتاً خوبی برای شبیه‌سازی دو هفته یک‌بار غلظت رسوب و کل فسفر داشت (مدل توانست هیدرو گراف‌های رواناب و نیترات را به‌خوبی شبیه‌سازی کند ولی در مورد رسوب تا حدودی ضعیف عمل کرد)[۶].

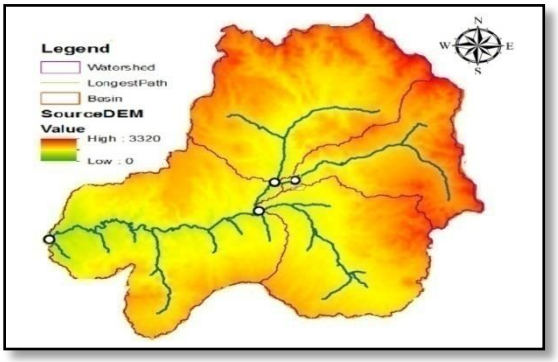
شول و همکاران (۲۰۰۸) در راستای طرح محاسبه توزیع زمانی و مکانی مقدار آب قابل‌دسترس جهانی، از مدل SWAT برای تخمین کل آب قابل‌استفاده غرب آفریقا در سطح چهار میلیون کیلومترمربع استفاده کردند[۷].

محققین یادشده علت استفاده از مدل SWAT را توانایی مدل در شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژی به‌صورت ساده و واقع‌بینانه معرفی کردند؛ و همچنین اهمیت پارامترهای ورودی به مدل را جهت اطمینان از خروجی شبیه‌سازی را ضروری دانستند.رواناب ایجادشده در یک حوضه از مهم‌ترین موضوعات در مطالعات هیدرولوژیکی منطقه است، زیرا اکثر فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم با آن در ارتباط هستند و به نوعی از آن متأثر می‌شوند؛ بنابراین با توجه به اهمیت موضوع و با هدف کمک به مدیریت بهتر منابع آب منطقه، در این پژوهش مدل هیدرولوژیکی بخشی از حوضه زرینه‌رود به کمک مدل نیمه توزیعی ARCSWAT در محیط GIS تهیه شد که روند مدل‌سازی، نتایج شبیه‌سازی، آنالیز حساسیت پارامترها، واسنجی و اعتبار سنجی دبی ماهانه و بررسی تأثیر منابع ارتفاع مختلف بر رواناب حوضه، در این مقاله ارائه می‌شود.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه مورد پژوهش

حوضه آبریز رودخانه زرینه‌رود در شمال غرب کشور واقع‌شده و یکی از مهم‌ترین زیر حوضه‌های موجود در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشد که در محدوده‌ای بین عرض ۳۵° ۴۰´ تا ۳۸° ۳۷´ و طول جغرافیایی ۴۵°۴۶´ تا ۴۷° ۲۳´ قرار دارد. رودخانه زرینه‌رود آبراهه اصلی این حوضه است که توسط سد زرینه‌رود کنترل می‌شود. وسعت حوضه آبریز موردبررسی ۲۲۴۵۱۰/۷ کیلومترمربع می‌باشد. (شکل ۱)



شکل ۱. نقشه توپوگرافی حوضه آبریز موردمطالعه

۲-۲-معرفی مدل SWAT

مدلSWAT مدلی در مقیاس پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی و کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی‌شده است. برای رسیدن به این اهداف مدل SWAT، مدلی است که به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، این مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد آب‌وهوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه می‌باشد. فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی و... در این مدل به‌طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند[۸]. برای اهداف شبیه‌سازی در این مدل، یک حوضه به تعدادی زیر حوضه و زیر حوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچک‌تر (واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی،HRU) تقسیم می‌شوند.که از ترکیب نقشه‌های طبقات شیب، کاربری اراضی و خاک حاصل می‌شود. واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRU ها)، اراضی یکپارچه‌ای هستند که دارای ترکیباتی یکسانی از پوشش، خاک و مدیریت می‌باشند[۸]. بر این اساس، باید SWAT را یک مدل نیمه توزیعی به شمار آورد. ازنظر زمانی نیز فرآیندهای مختلف بیان شده را می‌توان در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه و یا سالانه شبیه‌سازی کرد.بدون توجه به نوع مسئله‌ای که توسط مدل SWAT مطالعه می‌شود، بیلان آب، نیروی محرک هر

پدیده‌ای است که در سطح حوضه رخ می‌دهد. برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل روش‌های متعددی وجود دارد که سه روش پنمن- مونتیث، تیلور و روش‌های هارگریوز در مدل گنجانده‌شده است.

روند یابی جریان نیز می‌تواند به دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگهام و رواناب سطحی با روش شماره منحنی اصلاح‌شده محاسبه می‌شود[۸].

روابط استفاده شده برای برآورد رواناب سطحی به‌صورت زیر می‌باشد.

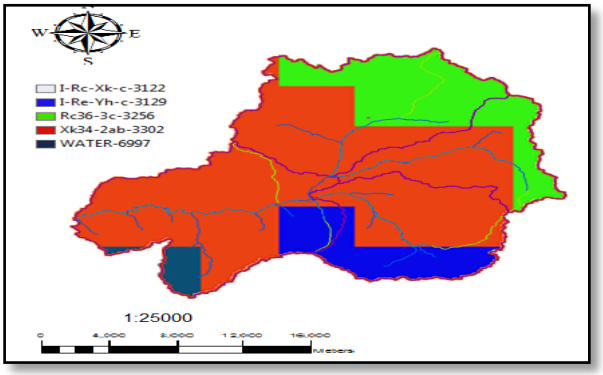
(۱)

$$Q_{surf} = (R_{day} - I_a)^2/(R_{day} - I_a + s)$$

که در آن، Q_{surf} مقدار رواناب یا بارش مازاد، R_{day} مقدار بارش در روز موردنظر ، I_a جذب اولیه (که شامل ذخیره سطحی، ذخیره لاشبرگ و نفوذ قبل از شروع رواناب می‌باشد)، و S عامل نگهداشت می‌باشد که همگی واحد یکسانی از مقدار آب دارند. عامل نگهداشت خود تابعی از متغیرهای مکانی شامل خصوصیات خاک، کاربری اراضی مدیریت و شیب زمین و متغیر وابسته به زمان یعنی محتوای آب قابل‌دسترس خاک است.در این مطالعه از ویرایش SWAT2012 که دارای یک برنامه الحاقی در نرم‌افزار Arc GIS به نام Arc SWAT می‌باشد، استفاده‌شده است.

۳-آماده‌سازی مدل SWAT و فرآیند اجرا

اطلاعات ورودی و داده‌های اساسی مدل شامل نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه‌شده از سازمان جغرافیای کشور، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، داده‌های هواشناسی از قبیل بارندگی و حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه و دبی رودخانه در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه جهت انجام مراحل واسنجی می‌باشد. مدل پایه جهت شبیه‌سازی در این تحقیق نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه‌شده از سازمان نقشه‌برداری کشور است که ۵ طبقه کاربری اراضی در منطقه شناسایی گردید. برای واردکردن اطاعات خاک، نقشه جهانی فائو مورداستفاده قرار گرفت که بر اساس آن ۳ طبقه کلاس بافت خاک در حوضه تشخیص داده شد. اطلاعات بارندگی منطقه از ۴ ایستگاه هیدرومتری آلاسقل، شاخه چپ آلاسقل، شاخه راست آلاسقل، پل ساروق چای و صفاخانه ؛ و کلیماتولوژی منطقه از ایستگاه سینوپتیک تکاب دریافت گردید. ازآنجایی‌که برای واسنجی باید حداقل یک ایستگاه هیدرومتری در خروجی حوضه باشد، تنها ایستگاه هیدرومتری در خروجی، ایستگاه صفاخانه بود.



شکل ۲. نقشه اطلاعات خاک شناسی منطقه

پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه و تهیه فایل‌های ورودی، مراحل اجرای مدل به ترتیب ارائه‌شده، انجام شد.

۱- در مرحله اول با واردکردن نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ با تعیین حداقل مساحت دلخواه توسط کاربر، حوضه به تعدادی زیر حوضه تقسیم می‌شود. رابط Arc SWAT برای هر زیر حوضه مشخصات فیزیکی از قبیل مساحت، طول آبراه اصلی، شیب و غیره را تعیین می‌کند. ۲- واردکردن نقشه کاربری اراضی و خاک و اطلاعات شیب منجر به تولید واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی می‌شود. حوضه موردمطالعه به سه‌طبقه شیب تقسیم‌شده که شامل ۰ تا ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۲۵ درصد و بیش از ۲۵ در صد می‌باشند. ۳- همان‌طور که اشاره شد مدل برای اجرا نیاز به داده‌های هواشناسی دارد که اطلاعات آن از ایستگاه سینوپتیک تکاب تهیه شد. ۴- برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل روش‌هارگریوز و روند یابی جریان از روش ماسکینگهام استفاده شد.

۴-آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبار سنجی

شناسایی پارامترهایی که بر نتایج خروجی مدل مؤثر می‌باشند، ضروری است؛ که از آن تحت عنوان آنالیز حساسیت یاد می‌شود. هدف اصلی آنالیز حساسیت، تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و این‌که کدام عامل همبستگی بیشتری با خروجی دارد. با انجام تحلیل حساسیت می‌توان عوامل مهم و حساس را شناخته و با تمرکز بر روی آن‌ها واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد. لذا واسنجی احتیاج به تغییر مکرر مقدار پارامترها و اجرای برنامه دارد، استفاده از یک برنامه واسط برای انجام خودکار مراحل کار ضروری است که بدین منظور برنامه واسط به نام SWAT-CUP تدارک دیده‌شده است[9]. در این مطالعه از روش الگوریتم SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2) به‌منظور تسهیل واسنجی مدل استفاده شد. الگوریتم SUFI2 طی ۹ گام اجرا می‌شود که عبارتند از : تعریف تابع هدف (در مطالعه حاضر معیار ناش- ساتکلیف)، تعریف حد بالا و پایین دامنه هر پارامتر، آنالیز حساسیت مطلق برای همه پارامترها، تعیین نخستین دامنه عدم قطعیت هر پارامتر برای نمونه‌برداری لاتین هایپرکیوب، نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب در هر مرحله شبیه‌سازی، محاسبه تابع هدف انتخابی در گام اول برای هر مرحله شبیه‌سازی، محاسبه حساسیت نسبی، محاسبه عدم قطعیت، پیشنهاد NS دامنه جدید برای هر پارامتر به‌منظور کاهش عدم قطعیت توسط الگوریتم می باشد. تمام عدم قطعیت‌ها شامل عدم قطعیت ورودی‌ها (مانند بارندگی)، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در مدل‌سازی در نظر می‌گیرد. سنجش میزان عدم قطعیت که دربرگیرنده تمام موارد اشاره‌شده فوق می‌باشد، توسط معیاری به نام P-factor که بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) قرار می‌گیرند، صورت می‌گیرد. ازآنجایی‌که اثر تمام عوامل عدم قطعیت در متغیر اندازه‌گیری شده منعکس می‌شوند، P-factor معیار مناسبی برای سنجش قدرت آنالیز عدم قطعیت انجام‌شده می‌باشد. فاکتور دیگری که در برآورد قدرت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت به کار می‌رود، R-factor می‌باشد. R-factor برابر است بافاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیف ۹۵ درصد، تقسیم‌بر انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده؛ بنابراین در SUFI-2 هدف در برگرفتن بیشترین مقادیر مشاهده‌شده با کمترین ضخامت باند می‌باشد. شرایط ایده آل در یک شبیه‌سازی زمانی است که مقدار P-factor، به یک و R-factor، به صفر نزدیک باشد[۶].

به‌منظور مقایسه خروجی مدل با اندازه‌گیری شده در ایستگاه تکاب تابع هدف$\emptyset$ بر طبق معادله (۲) مورداستفاده قرار گرفت:

$$\emptyset = \begin{cases} |b|R^2 & \text{if } |b|\leq 1 \\ |b|^{-1}R^2 & \text{if } |b|\geq 1 \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن R^2 ضریب همبستگی یا ضریب تبیین بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده و b شیب‌خط رگرسیون بین آن‌ها می‌باشد (Abbaspour,2011).

ضریب تبیین: در آن $\overline{Q_O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و $\overline{Q_S}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده است. ضریب ۰ تا ۱ تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن ۱ است.

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{Oi}-\overline{Q_O})(Q_{Si}-\overline{Q_S})]^2}{\sum_i (Q_{Oi}-\overline{Q_O})^2 \sum_i (Q_{Si}-\overline{Q_S})^2} \quad (۳)$$

ضریب ناش- ساتکلیف: مقدار ضریب ناش- ساتکلیف بین ۱ تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص ۱ است. مقادیر بین صفر و ۱ قابل‌قبول بوده و کمتر از صفر پذیرفتنی نیست. اگر میزان آن از ۰.۵ بیشتر باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود. [۱۰].مقادیر ناش- ساتکلیف بیشتر از ۷۵ درصد را عالی و مقادیر بین ۰.۳۶ و ۰.۷۵ را رضایت‌بخش بیان می‌کنند.

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_O - Q_S)_i^2}{\sum_i (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad (۴)$$

۴-۱-اعتبار سنجی

اعتبار سنجی اجرای مدل با استفاده از مقادیر بهینه‌شده در مرحله واسنجی است. هدف از اعتبار سنجی اطمینان یافتن از این است که مدل واسنجی شده می‌تواند به‌درستی شرایط منطقی را برای سری‌های متفاوتی تعمیم دهد. به‌منظور اعتبار سنجی، الگوریتم SUFI2 در ۱۰۰۰ تکرار و ۵۰۰ نمونه‌برداری، یا استفاده از مقادیر پارامترهای حاصل از واسنجی، برای سال‌های ۲۰ ساله از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۷ بر اساس گام زمانی ماهانه صورت گرفت. بازه زمانی ۱۹۸۶-۱۹۸۸ به‌عنوان Warm up در نظر گرفته شد تا مدل با شرایط محیطی متعادل شود.با توجه به نتایج تحلیل حساسیت مدل، عوامل مهم و مؤثر شناسایی‌شده و در بهینه کردن مدل مورداستفاده قرار گرفت ، از بین ۴۸ پارامتر که بر روی دبی خروجی از حوضه مؤثر، شناسایی شدند. پس از انجام آنالیز حساسیت نسبی، دبی خروجی منطقه به ۱۱ پارامتر حساسیت نشان داد. در جدول ۱ ، مقادیر حساس مدل در بهترین حالت واسنجی آورده شده است.در ستون اول جدول ۱ (علامت اختصاری)، r نشان‌دهنده رو Multiple و *v* نشان‌دهنده روش Replace در واسنجی می‌باشد. این روش‌ها برای سهولت تغییر مقدار عوامل در واسنجی ابداع‌شده‌اند. در روش Replace، مقدار اولیه عامل موردنظر با ارزش داده‌شده جایگزین می‌شود، اما در روش Multiple، مقدار اولیه عامل در (مثبت یک ارزش داده‌شده) ضرب می‌شود.

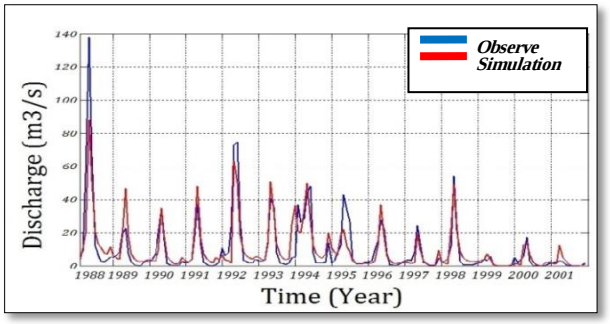
از میان پارامترهای موجود، پارامترهای جدول شماره ۱ دارای p-value هایی بودند که به مقدار صفر نزدیک بود. به‌عنوان‌مثال پارامتر *CN*، را می‌توان یکی از پارامترهای بسیار مهم در تعیین میزان جریان رواناب در حوضه آبریز شناخت. تأثیر عدد منحنی بدین ترتیب است که با افزایش عدد منحنی جریان پایه کاهش‌یافته و رواناب سطحی افزایش می‌یابد. این افزایش به جهت آن است که با افزایش عدد منحنی مقدار نفوذ کاهش‌یافته و به دنبال آن رواناب سطحی افزایش می‌یابد. علاوه بر CN، پارامترهایی که با جریان آب زیرزمینی در ارتباط می‌باشند بیشترین تأثیر را بر خروجی از حوضه دارند که از آن جمله می‌توان به GW-DELEY (زمان تأخیر بین خارج شدن آب آبیاری از پروفیل خاک و ورود آن به آبخوان سطحی) وGWQMN (عمق آبی که بالاتر از آن به‌عنوان آب برگشتی در نظر گرفته می‌شود) اشاره کرد. اهمیت این پارامترها بر دبی خروجی از حوضه نشان‌دهنده تأثیرگذاری متقابل آب زیرزمین و آب سطحی بر هم می‌باشد و لزوم شبیه‌سازی مناسب این فرآیند را تأکید می‌کند.

جدول شماره۱. نتایج تحلیل حساسیت مدل و واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل

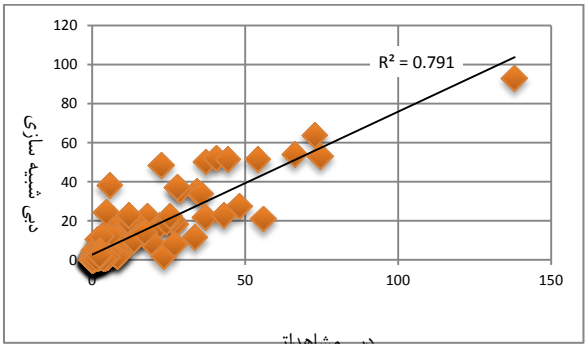
نام عامل	نام پارامترها	واحد	t-Stat	P-Value
آب قابل‌دسترس خاک	r__SOL_AWC.sol	-	۵.۲۲۸۸	۰.۰۰۰۰
هدایت هیدرولیکی اشباع	r__SOL_K.sol	mm/hr	۴.۵۹۳۹	۰.۰۰۰۰
زمان تأخیر آب زیرزمینی	V__GW_DELAY.gw	روز	۴.۴۲۹۳	۰.۰۰۰۰
افت آهنگ بارش	V__PLAPS.sub	mm/km	۲.۹۲۵۰	۰.۰۰۳۶
چگالی توده خاک	r__SOL_BD.sol	g/cm3	-۲.۷۵۷۰	۰.۰۰۶۱
افت آهنگ دما	V__TLAPS.sub	°C/km	-۲.۵۷۱۶	۰.۰۱۰۴
ثابت تخلیه آب زیرزمینی	V__ALPHA_BF.gw	روز	۲.۲۵۱۶	۰.۰۲۴۸
حداقل مقدار ذخیره آب	V__GWQMN.gw	mm	-۱.۹۵۳۵	۰.۰۵۱۴
ضریب تبخیر آب زیرزمینی	r__GW_REVAP.gw	-	-۱.۸۹۲۱	۰.۰۵۹۱
شماره منحنی CN	r__CN2.mgt	-	-۱.۸۲۳۳	۰.۰۶۸۹
برگاب	**r__CANMX.hru**	**mm H2O**	**-۱.۷۸۵۲**	۰.۰۷۴۹

۴-۲-ارزیابی کارایی مدل و مقایسه هیدروگراف های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی

در این پژوهش از آمار ۱۴ سال (۱۹۸۸-۲۰۰۱) برای اجرای مدل استفاده شد. ازاین‌رو مقدار دبی ماهانه برای داده‌های مشاهداتی حاصل از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و سناریوی وضع موجود محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج برای سال‌های ۱۹۸۸-۲۰۰۱ در شکل شماره ۳ وشکل **شماره۴** آمده است.مقایسه دبی مشاهداتی و دبی شبیه‌سازی‌شده حاصل از داده‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ توسط مدل SWAT نشان می‌دهد که داده‌های مربوط به دبی ماهانه همبستگی (R^2) مناسب (۰/۷۹) و ضریب Nash مناسب (۰/۷۹) را دارند.مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در سطح جهان (Bekiaris، ۲۰۰۵؛ Alansi،۲۰۰۹ و Sadeghi، ۲۰۱۰) نشان می‌دهد که با وجود چالش‌های مربوط به داده‌های ورودی برای آبخیز مورد مطالعه، دقت شبیه‌سازی قابل‌قبول و تقریباً مشابه با نتایج سایر محققین به‌دست‌آمده است (گزارشی از نتایج سایر محققین در Hosseini و همکاران، ۲۰۱۲ ارائه‌شده است). نتایج این مطالعه نشان داد، که نه‌تنها مدل برای حوضه با داده‌های کم قابلیت شبیه‌سازی دارد بلکه برای حوضه‌های آبریز بزرگ مقیاس هم نتایج بهتری ارائه می‌دهد. در نمودار زیر محور افقی بیانگر سال‌های کالیبراسیون و محور قائم بیانگر میزان دبی موجود در هرکدام از سال‌ها می‌باشد. در این نمودار خط آبی‌رنگ دبی مشاهداتی و خط قرمزرنگ دبی شبیه‌سازی‌شده می‌باشد.



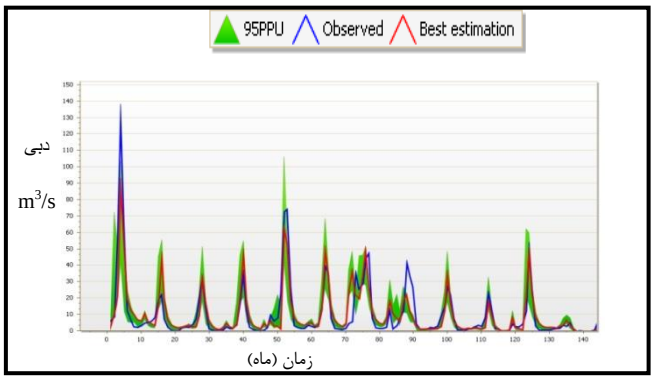
شکل شماره ۳. سری زمانی دبی ماهانه مشاهداتی و دبی ماهانه شبیه‌سازی‌شده



شکل شماره۴. منحنی برازش داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی دبی ماهانه

۴-۳-تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل SWAT و تأثیر آن بر رواناب

مدل SWAT دارای پارامترهای متعددی می‌باشد که هرکدام از آن‌ها دارای عدم قطعیت بوده و نمی‌توان مقدار واحدی را برای آن‌ها در نظر گرفت. ازاین‌رو محدوده‌ای برای تغییرات این پارامترها در نظر گرفته شد و با توجه به آن‌ها، دامنه تغییرات خروجی‌های مدل ارزیابی می‌شود. در این تحقیق، عدم قطعیت مدل با استفاده از الگوریتم SUFI-2 و برای ایستگاه سینوپتیک تکاب صورت گرفت. سپس با استفاده از شاخص‌های P-factor و R-factor و نکویی برازش (NES,R^2) به بررسی عملکرد مدل در شرایط عدم قطعیت پارامترهای آن پرداخته شد. باند عدم قطعیت دبی خروجی در ایستگاه مربوطه در شکل شماره ۵ آمده است.



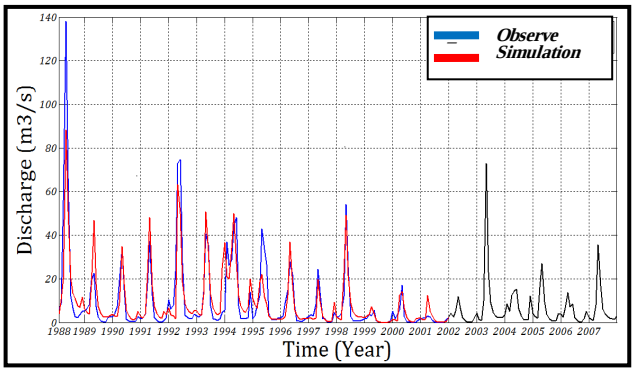
شکل شماره۵. بازه عدم قطعیت ایستگاه تکاب در دوره واسنجی مدل

شکل شماره، محور افقی تعداد سال و محور قائم مقدار دبی ماهانه رواناب را نشان می‌دهد. خطوط آبی‌رنگ بیانگر مقدار دبی مشاهداتی و خطوط قرمزرنگ بیانگر تخمین با استفاده از پارامترهای مؤثر و رنگ سبزرنگ95PPU یا باند عدم قطعیت می‌باشد که در مطالب قبل به توضیح آن پرداخته‌شده است. همان‌طور که در

جدول شماره مشاهده می‌گردد در دوره کالیبراسیون مدل، دبی شبیه‌سازی همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی داشته به‌طوری‌که ضریب همبستگی آن برای ایستگاه موردنظر ۰/۷۹ و ضریب نش آن نیز ۰/۷۹ می‌باشد . نتایج بازه صحت سنجی برای سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۷ انجام‌شده است. که در شکل شماره ۶ نشان داده‌شده است.

جدول شماره۲. جدول ضریب همبستگی ماهانه رواناب حوضه در دوره کالیبراسیون

ایستگاه	P-factor	R-factor	R2	NS
تکاب	۰/۵۸	۰/۵۱	۰/۷۹	**۰/۷۹**



شکل شماره .Error! No text of specified style in document. بازه عدم قطعیت ایستگاه تکاب در دوره کالیبراسیون و صحت سنجی

۵-نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱جمع‌بندی

همان‌طور که در فصول قبل اشاره شد، برای تخمین میزان بارش- رواناب در حوضه‌های فاقد شبکه متراکم از ایستگاه‌های باران‌سنجی می‌توان از مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده کرد.مدلSWAT یک مدل فیزیکی است که به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، نیازمند اطلاعاتی در مورد آب‌وهوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه می‌باشد.برای مدل‌سازی درSWAT داده‌های ورودی ازجمله نقشه‌های رقومی ارتفاعی که از منابع مختلف رقومی ارتفاعی و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه‌شده که همراه با نقشه خاک و کاربری اراضی و همچنین بارش روزانه، دمای MAX و MIN روزانه و سرعت باد به مدل وارد شد.این مدل که با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی حوضه به مدل‌سازی می‌پردازد از واحدهای واکنش‌های هیدرولوژیکی (HRU) ها جهت یکسان‌سازی پوشش، خاک و مدیریت بهره می‌گیرد.

۱- نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که شبیه‌سازی در حوضه‌های بزرگ بهتر انجام می‌شود

۲- نتایج حاصل از مقایسه دبی تولیدی ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ حاکی از تطابق زیاد این دو نمودار باهم می‌باشد.

۳- دبی تولیدی ماهانه حاصل از داده‌های توپوگرافی در مدل SWATCUP به مدت ۱۴ سال کالیبره شد؛ و پارامترهای حاصل از واسنجی مدل، به‌عنوان پارامترهای مؤثر در مدل SWATCUP برای هر یک از دیگر منابع رقومی ارتفاعی، طی یک مرحله کالیبره صحت سنجی شد؛ و نتایج نشان داد که داده‌های حاصل از نقشه‌های توپوگرافی با توجه به مقادیر ضریب همبستگی ضریب $R2$ و $N2$ برابر با ۰/۷۹، مناسب برای این حوضه می‌باشد.

۵-۲- پیشنهادهایی برای پروژه‌های آتی

با توجه به نتایج برآمده از این تحقیق می‌توان برای مطالعات آتی مواردی را پیشنهاد کرد.اجرا و کالیبراسیون مدل به‌کاررفته در تحقیق حاضر با داده‌های روزانه و کمتر از روزانه که می‌تواند مخصوصاً در مواقع سیلابی، اطلاعات

مناسب‌تری را از دبی ارائه کند. پیشنهاد می‌شود به همراه شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل کالیبره SWAT-CUP، مقدار رسوب نیز به همراه دبی کالیبره شود.استفاده از نرم‌افزارهای دیگر جهت شبیه‌سازی مدل و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌تواند در ارزیابی توانمندی نرم‌افزار مؤثر باشد.پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های ماهواره‌های برای مناطق اقلیمی و جغرافیایی مختلف کشور، در تخمین بارش در شبیه‌سازی بارش-رواناب استفاده شود.ارزیابی اثر توان تفکیک مدل‌های رقومی ارتفاعی در آستانه‌های مختلف شکل‌گیری آبراهه‌ها بر نتایج مدل بارش-رواناب و پارامترهای ژئومورفولوژیکی می‌تواند در بالا رفتن دقت نتایج بسیار مؤثر باشد. مدل‌سازی زیست‌محیطی و مدیریتی برای پیش‌بینی سیلاب با استفاده از محصولات ماهواره‌ای در تحقیقات آتی ضروری به نظر می‌رسد.

منابع و مراجع

۱. Neitsch, S.L., et al., *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. 2011, Texas Water Resources Institute.

۲. Long, D., et al., *GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas.* Geophysical Research Letters, 2013. 40(13): p. 3395-3401.

۳. Gassman, P.W., et al., *The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions.* 2007.

۴. Shepherd, B., D. Harper, and A. Millington, *Modelling catchment-scale nutrient transport to watercourses in the UK.* Hydrobiologia, 1999. 395: p. 227-238.

۵. Muleta, M.K. and J.W. Nicklow, *Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model.* Journal of Hydrology, 2005. 306(1): p. 127-145.

۶. Abbaspour, K., M. Vejdani, and S. Haghighat. *SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT*. in *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. 2007.

۷. Schuol, J., et al., *Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model.* Journal of Hydrology, 2008. 352(1): p. 30-49.

۸. Neitsch, S., et al., *Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2005.* Texas, USA, 2005.

۹. Abbaspour, K., *User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs, 103 pp., Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat.* Sci. and Technol., Duebendorf, Switzerland.[Available at http://www. eawag. ch/forschung/siam/software/swat/index.], 2011.

۱۰. Spruill, C., S. Workman, and J. Taraba, *Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model.* Transactions of the ASAE, 2000. 43(6): p. 1431-1439.