



مدل سازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز با استفاده از مدل ArcSWAT

عطاالله کاویان*^۱، محمد گلشن^۲، حامد روحانی، اباذر اسمعیلی عوری

۱- دانشیار، رشته آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۲- دانشجوی دکتری، رشته آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

پست الکترونیک نویسنده مسئول: ataollah.kavian@yahoo.com

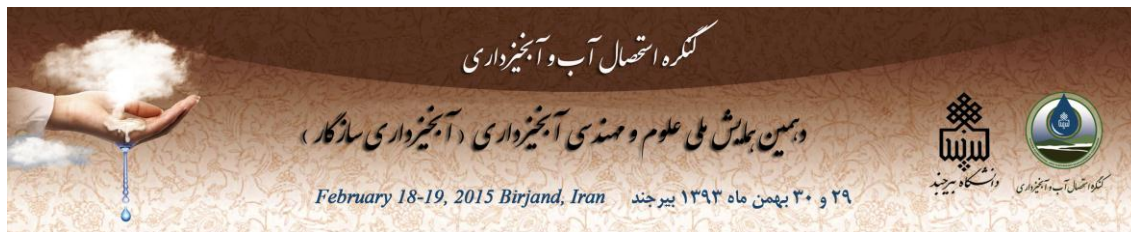
چکیده

شبیه‌سازی جریان رودخانه و درک درستی از مولفه‌های مختلف چرخه هیدرولوژی برای برنامه‌ریزی در جهت حفاظت از منابع آبی حائز اهمیت است. از طرف دیگر، عدم برآورد مناسب رواناب حاصل از بارش در حوزه آبخیز، مدیریت بهینه‌ی منابع آبی و انجام پروژه‌های مختلف آبخیزداری را دچار مشکل می‌نماید. در این تحقیق مدل SWAT که یک مدل در مقیاس حوضه آبریز است برای شبیه‌سازی جریان رودخانه نمارستاق در استان مازندران استفاده شده است. بدین‌منظور و جهت اجرای مدل SWAT ابتدا لایه‌های اطلاعاتی کاربری اراضی، خاکشناسی و نقشه رقومی ارتفاع روهم‌گذاری گردید و در نهایت تعداد ۵۵۵ واحد هیدرولوژیکی (HRU) تعیین گردید. سپس آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی به مدل جهت تعیین پارامترهای حساس با روش SUFI2 انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد مدل نسبت به پارامترهای CN، ALPHA-BNK و CH-K2 از حساسیت بالایی برخوردار است. واسنجی مدل به منظور شبیه‌سازی رواناب برای سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ انجام شد و با استفاده از نمایه‌های آماری ضریب همبستگی (R^2)، ضریب نش-ساتکلیف (NS) و مجموع مربعات خطا (MSE) مورد ارزیابی قرار گرفت. ضرایب آماری در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۵ و ۲/۷۰۹ و در مرحله اعتبار سنجی که برای سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ انجام شد، ضرایب آماری به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۷۰ و ۰/۱۷ به دست آمد. نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه حوزه آبخیز نمارستاق می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، صحت سنجی، واسنجی، SWAT

الف- مقدمه

درک و پیش‌بینی فرآیندهای تولید و انتقال جریان به خروجی حوضه آبخیز یکی از اساسی‌ترین مباحث در علم هیدرولوژی محسوب می‌شود. به دلیل تاثیرات متقابل عوامل، رفتار چرخه‌ی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز به فرآیند نسبتاً پیچیده‌ای تبدیل می‌شود (کبیر، ۱۳۸۵). مدل‌های هیدرولوژیکی این امکان را فراهم می‌آورند تا با شبیه‌سازی بارش - رواناب، عکس‌العمل حوضه را با صرف حداقل هزینه و زمان به‌دست آورد (شریفی و همکاران، ۱۳۸۳). مدل SWAT به-منظور پیش‌بینی اثرات فعالیت‌های مدیریتی اراضی بر جریان دبی، تولید رسوب و عوامل آلودگی در مقیاس حوضه آبخیز و در بازه زمانی طولانی مدت توسعه یافته است (نیتج و همکاران، ۲۰۰۵). در راستای مدیریت حوضه آبخیز و جلوگیری

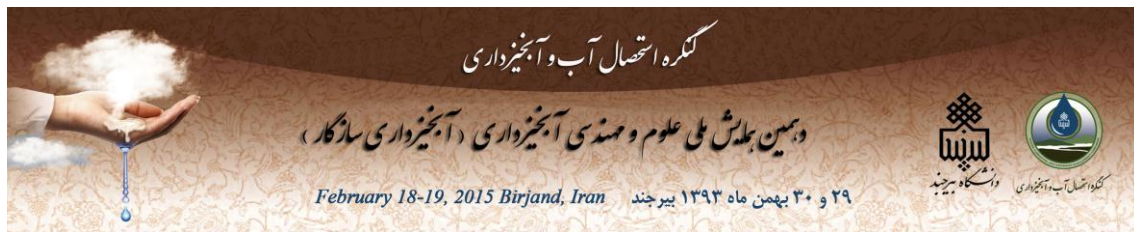


از بروز ناسازگاری در اقدامات طراحی شده در سطح حوضه، به مدلی نیاز است که بتواند حجم وسیعی از داده‌ها را در شبیه‌سازی به کار ببرد (کاویانپور و همکاران، ۱۳۹۰). در مطالعه‌ای در کره جنوبی هیونگ و همکاران (۲۰۱۱)، از برنامه‌های *SUF2*، *PARASOL* و *GLUE* در تحلیل حساسیت پارامترهای موثر در شبیه‌سازی رواناب و کیفیت آب حوضه سد چانگ‌جو، استفاده نمودند. در آنالیز حساسیت با استفاده از شاخص‌های *p-value* و *t-test* حساس‌ترین پارامترها شماره منحنی، هدایت هیدرولیکی موثر بستر رودخانه اصلی و زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی شناخته شدند. استراچ و همکاران (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ای در برزیل با استفاده از گروه داده‌های بارش عدم قطعیت مدل *SWAT* در شبیه‌سازی جریان رودخانه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پارامتر متغیر عدم قطعیت به میزان قابل توجهی به روش‌های تولید مجموعه داده بارش بستگی دارد. لایرون و جانسون (۲۰۱۲)، پاسخ هیدرولوژیکی تغییرات آب و هوا را در حوضه رودخانه پکن در جنوب چین با استفاده از مدل *SWAT* بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد وقتی بارندگی ثابت است با افزایش دما، تبخیر و تعرق افزایش و دبی آب کاهش می‌یابد. همچنین وقتی درجه حرارت ثابت است با افزایش بارندگی، تبخیر و تعرق و دبی آب افزایش خواهد یافت. تانگ و همکاران (۲۰۱۲)، در مطالعه‌ای مدل *SWAT* را برای اجراء مدل هیدرولوژیکی در حوضه رودخانه چاو^۱ در چین انتخاب کردند کالیبراسیون و آنالیز عدم دقت مدل با روش (*SUF2*) انجام شد. برای دوره واسنجی (۱۹۹۹ - ۱۹۹۵) *P-factor* و *R-factor* به ترتیب ۰/۸۵ و ۱/۱۲ و برای دوره اعتبارسنجی (۲۰۰۰-۲۰۰۲) به ترتیب ۰/۸۳ و ۲/۱۵ به دست آمدند. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل *SWAT* در شبیه‌سازی جریان رودخانه می‌باشد. با توجه به اینکه سابقه بکارگیری از مدل *SWAT* در داخل کشور به یک دهه اخیر برمی‌گردد، بنابراین بررسی هر چه بیشتر این مدل در حوضه‌های آبخیز با شرایط زمین محیطی مختلف می‌تواند به ارزیابی‌های دقیق‌تر از این مدل بیانجامد.

ب- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه با وسعت ۲۳۳۰۰ هکتار در جنوب استان مازندران واقع شده است و از نظر تقسیمات سیاسی جزء شهرستان آمل و حوضه آبریز هراز می‌باشد. متوسط میزان بارندگی سالانه ۴۲۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه منطقه ۱۱ درجه سانتیگراد می‌باشد.

^۱ - Chao



۱- تئوری مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل مفهومی - نیمه توزیعی در مقیاس حوضه است که دارای بازده محاسباتی بالایی می‌باشد. این مدل به صورت پیوسته زمانی می‌باشد، که در گام‌های زمانی متفاوتی به صورت ساعتی، روزانه و یا طولانی مدت اجرا می‌شود. مدل یک حوضه را به تعداد زیادی زیرحوضه تقسیم می‌کند و با این عمل جزئیات مکانی را شبیه‌سازی می‌کند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد. در این مدل ابتدا حوضه مورد مطالعه به صورت یک نقشه رستری به مدل داده می‌شود و سپس بعد از اجرا کردن مراحل اولیه، مدل زیرحوضه‌هایی از حوضه اصلی تهیه می‌کند و این زیر حوضه‌ها به طور مکانی با هم ارتباط دارند. مدل SWAT به صورت مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی متفاوت می‌باشد که برای شبیه‌سازی پارامترهای متفاوت به صورت روزانه، ماهانه و سالانه طراحی گردیده است (نیتج و همکاران، ۲۰۰۵). در مدل SWAT شبیه‌سازی هیدرولوژی به دو بخش اصلی طبقه بندی می‌شوند که بخش اول مربوط به فاز خشکی چرخه هیدرولوژیکی است، این بخش مقدار آب، رسوب، مواد مغذی و آفت‌کش‌هایی را که وارد رودخانه اصلی می‌شوند را کنترل می‌کند. بخش دوم مربوط به فاز آبی یا مرحله روندیابی می‌باشد که در واقع حرکت آب، رسوبات و سایر فرآیندها از طریق شبکه آبراه‌ها در سطح حوضه به سوی خروجی، آن را شبیه‌سازی می‌کند.

۲- چرخه هیدرولوژی در مدل SWAT

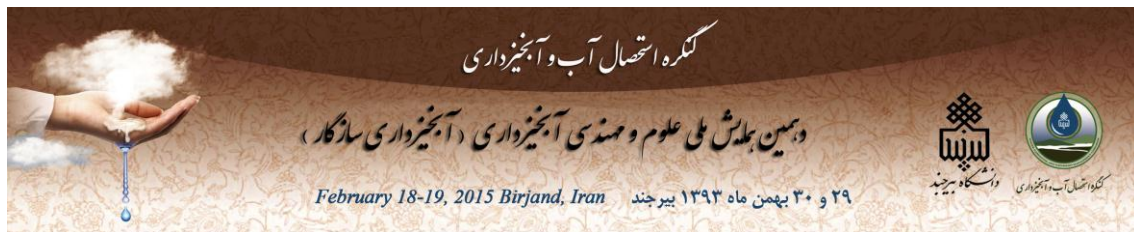
چرخه هیدرولوژیکی که در این مدل شبیه‌سازی می‌شود براساس بیان آبی است که به صورت معادله زیر می‌باشد:

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

در این رابطه SW_t - مقدار نهایی آب در خاک (میلی متر)، t - زمان (روز)، SW_0 - مقدار آب موجود در خاک (میلی متر)، R_{day} - مقدار بارش در روز t ام (میلی متر)، Q_{surf} - مقدار رواناب سطحی در روز t ام (میلی متر)، E_a - مقدار تیخیر و تعرق در روز t ام (میلی متر)، W_{seep} - مقدار آب نفوذ کرده به منطقه قشری در پروفیل خاک (میلی متر) و Q_{gw} - مقدار جریان برگشتی در روز t ام (میلی متر) می‌باشد.

۳- واسنجی، تحلیل حساسیت و آنالیز عدم قطعیت پارامترهای مدل

روش‌های به کار برده شده برای انجام آنالیز حساسیت می‌تواند در دو گروه بررسی شود: آنالیزهای حساسیت موضعی و سرتاسری. آنالیز حساسیت موضعی، که با روش OAT (یک فاکتور در یک زمان) شناخته شده است، واکنش خروجی‌ها



توسط تغییرات متوالی هر پارامتر مدل را مشخص می‌کند، در حالی که دیگر پارامترها بدون تغییر می‌باشند (اسپروول و همکاران، ۲۰۰۰؛ هولوت و همکاران، ۲۰۰۵). در این تحقیق آنالیز حساسیت پارامتر با استفاده از روش ترکیبی نمونه-برداری LH و OAT، LH-OAT انجام می‌گیرد. روش نمونه برداری LH، روشی پیچیده برای انجام نمونه‌برداری تصادفی است که اجازه می‌دهد یک آنالیز قوی اجراهای زیادی را در پی نداشته باشد. از طرف دیگر روش OAT یک مثال از یک روش آنالیز حساسیت موضعی به سرتاسری یکپارچه است. در OAT هر اجرای مدل تنها انحراف یک پارامتر را به نوبت در برمی‌گیرد.

۴- معرفی معیارهای ارزیابی مدل

به منظور تحلیل کیفیت نتایج مدل، از ۳ نمایه آماری ضریب همبستگی (R^2)، راندمان نش - ساتکلیف (NS) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شد. ضریب همبستگی نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه میزان به بیشترین مقدار هماهنگی بین این دو سری مقدار نزدیک است و از صفر تا ۱ متغیر است. ضریب (NS) به عنوان تابع هدف در هنگام واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مقدار آن از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است و نشان می‌دهد که خط رگرسیونی بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیونی با شیب ۱ (خط اریب با شیب ۱:۱) نزدیک است. مقادیر ضریب راندمان نش - ساتکلیف صفر و یک متغیر است. با استفاده از نمایی می‌توان میانگین مربعات خطا، شبیه‌سازی که دارای کمترین MSE باشد از دقت بیشتری برخوردار است. روابط مربوط به محاسبه این پارامترها به شرح زیر می‌باشد:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

$$E_{NS} = \left[\frac{SSQ}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k}$$

در این رابطه‌ها Q_{obs} دبی مشاهده‌ای، Q_{sim} دبی شبیه‌سازی شده، \bar{Q}_{obs} می‌انگین دبی مشاهده‌ای، \bar{Q}_{sim} می‌انگین دبی شبیه‌سازی شده بر حسب متر مکعب بر ثانیه می‌باشد SSE تعییرات مربوط به داخل گروه‌ها یا واریانس خطا می‌باشد.



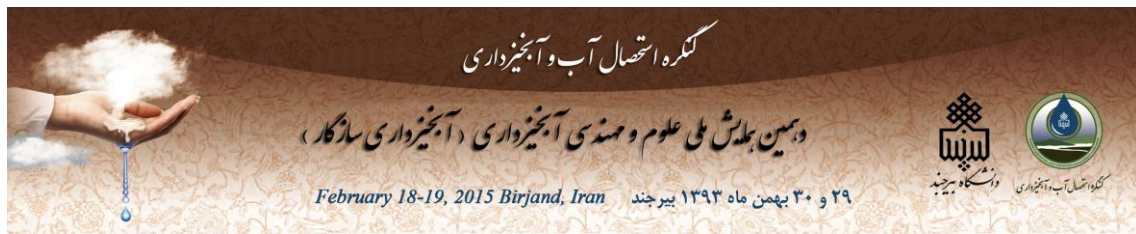
ج- نتایج و بحث

در این تحقیق از برنامه SWAT-CUP و الگوریتم *SUFI-2* به منظور نشان دادن حساسیت پارامترها استفاده شد. در جدول (۴-۱) پارامترهای درگیر در تحلیل حساسیت با مقادیر حداقل و حداکثر آنها آورده شده است. این پارامترها برای واسنجی و اعتبارسنجی در برنامه *SWAT CUP* مورد استفاده قرار گرفتند. در کل نتایج حاصله نشان داد که شماره منجنی (CN) به عنوان موثرترین پارامتر تأثیر گذار بر جریان رواناب منطقه می‌باشد. که با نتایج حاصل از مطالعات سلمانی و همکاران (۱۳۹۰)، سادات میرسانع و همکاران (۱۳۸۸) و پاناگوپولوس و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. پارامترهای فاکتور آلفا جریان پایه برای ذخیره کناری (ALPHA-BNK)، قابلیت هدایت هیدرولیکی موثر (CH-K2)، متوسط دمای هوا برای تبدیل باران به برف (SMTMP)، فاکتور گیرش گیاهی (EPCO) به ترتیب جزء مهمترین فاکتورهای کنترل کننده دبی جریان در حوضه آبخیز مورد مطالعه می‌باشند.

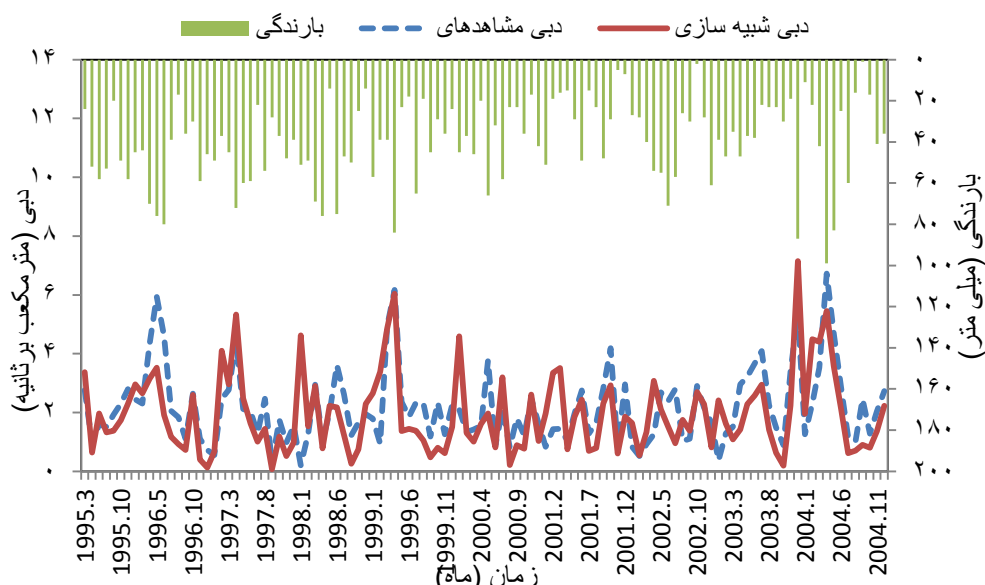
جدول ۴-۵- مقادیر بهینه پارامترهای مورد مطالعه برای شبیه‌سازی رواناب همراه با بازه مقادیر پارامترها با استفاده از برنامه *SUFI2*

ردیف	نام پارامتر	مقدار بهینه	حداقل	حداکثر
۱	v__CH_K2.rte	۴۸/۴۲۵	۰/۰۱	۱۵۰
۲	v__ALPHA_BNK.rte	۰/۰۱۴	۰/۰۱	۱
۳	r__SOL_BD().sol	-۱/۵۰۵	-۰/۲	۲/۵
۴	r__CN2.mgt	۰/۱۱۹	-۰/۸	۰/۸
۵	v__SMTMP.bsn	۰/۴۵۹	۰/۱۲	۱
۶	r__EPCO.hru	۰/۳۶۲	۰/۰۲	۱
۷	r__ESCO.hru	۰/۶۸۳	۰/۰۱	۱
۸	v__SMFMX.bsn	۳/۹۲۵	۰	۱۰

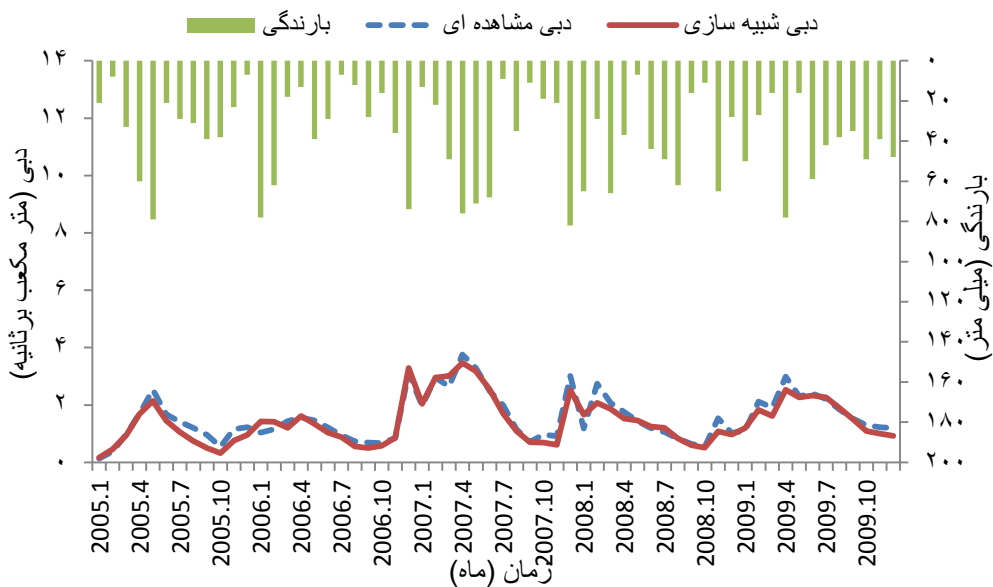
پس از اجرای مدل SWAT، فایل‌های نتایج شبیه‌سازی در مدل توسط نرم افزار *SWAT-CUP* دریافت و با انتخاب الگوریتم مورد نظر برای آنالیز عدم قطعیت توسط کاربر، تنظیمات لازم برای انجام کالیبراسیون صورت می‌گیرد. پس از یک دوره کالیبراسیون و مقایسه نتایج، محدود پارامترها در محدوده مجاز تعریف شده تغییر داده شده و مجدداً کالیبراسیون انجام می‌شود. این کار تا رسیدن به نتایج مطلوب بر اساس شاخص‌ها و روابط مشخص شده ادامه می‌یابد. برای کالیبراسیون دبی شبیه‌سازی شده از ۹ سال آمار دبی متوسط ماهانه ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پنجاب مربوط به سال‌های



۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ استفاده شد در ادامه از آمار مربوط به سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ برای صحت سنجی مدل استفاده گردید. نمودار مربوط به کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای بررسی عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی در دوره کالیبراسیون و دوره صحت سنجی شاخص‌های ارزیابی دقت شبیه‌سازی محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هی‌درومتري پنجاب



شکل ۲- نتایج حاصل از اجرای مدل در مرحله اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه هی‌درومتري پنجاب



جدول ۲- ضرایب حاصله در مرحله اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی رواناب در پای‌ه زمانی ماهی‌انه

ای‌سنگاه	مرحله	R^2	NS	MSE
پنجاب	واسنجی	۰/۶۸	۰/۵۵	۲/۷۰۹
	اعتمادسنجی	۰/۷۵	۰/۷۰	۰/۱۷

شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهند که مدل SWAT توانسته است به طور مطلوب دبی‌های اوج و متوسط ماهانه را شبیه‌سازی کند. که با نتایج حاصل از مطالعات سینتگن و همکاران (۲۰۱۰) و هیونگ و همکاران (۲۰۱۱) مطابقت دارد. در اوایل فصل بهار با افزایش دما برف‌های ارتفاعات منطقه شروع به ذوب شدن می‌کنند و مقدار دبی مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری پنجاب افزایش می‌یابد اما مدل به طور مطلوب نمی‌تواند افزایش دبی را برای این ماه‌ها شبیه‌سازی کند. که با نتایج حاصل از مطالعات اسپرویل و همکاران (۲۰۰۰) و عثمانی و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت دارد.

د- منابع

سادات میرصانع، ز؛ کاویانپور، م؛ دلاور، م. ۱۳۸۸. ارزیابی تاثیر پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی بر رواناب حوضه‌های آبریز به وسیله ی مدل SWAT هشتمین کنگره ی بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۸ص.
 سلمانی، ح. ۱۳۹۰. بهینه‌سازی پارامترهای موثر در بارش-رواناب در مدل نیمه توزیعی SWAT (مطالعه موردی زیرحوضه قزاقلی حوزه گرگانود استان گلستان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران، ۱۵۸ص.
 شریفی، ف؛ صفارپور، ش؛ ایوب زاده، س.ع. ۱۳۸۳، ارزیابی مدل رایانه ای AWBM2002 در شبیه سازی فرایند های هیدرولوژیکی تعدادی از حوزه های آبخیز ایران. پژوهش و سازندگی. شماره ۶۳، صفحه ۳۵-۴۲.
 کاویانپور، م؛ سادات میرصانع، ز. ۱۳۹۰. شبیه سازی هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبریز کشکان به وسیله ی مدل SWAT2005. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۹ص.
 کبیر، آ. ۱۳۸۵. مدل‌سازی بارندگی-رواناب در حوزه‌ی آبخیز کچیک استان گلستان، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، صفحه‌ی ۱۲۵.

Holvét, K., Van Griensven, A., Seuntjens, P. Vanrolleghem, P.A., 2005, Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT, Physics and Chemistry of the Earth, 30: pp 518-526.

Hyung –Kyung, J., Jong –Yoon, P., Hyun-Kyo, J., Hyung-Jin, S., Hyung-Joong, K., seong-joon, K. 2011. The uncertainty analysis of SWAT simulated stream flow and water quality applied to Chungju dam watershed of South Korea. dep of civil and environmental system eng, konkuk university seoul, south korea. 29 pp.

Hyung –Kyung, J., Jong –Yoon, P., Hyun-Kyo, J., Hyung-Jin, S., Hyung-Joong, K., seong-joon, K. 2011. The uncertainty analysis of SWAT simulated stream flow and water quality applied to Chungju dam watershed of South Korea. dep of civil and environmental system eng, konkuk university seoul, south korea. 29 pp.

Lirong, S. Jianyun, Z. 2012. Hydrological Response to Climate Changr in BeijiangRivr Basin Based on the SWAT model. ProcediaEngineering, vol(28), 241-245 pp.



Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2005.

Osmani, H., Motamed Vaziri, B., and Moeini, A. 2013. Flow simulation, calibration and validation of SWAT model (case study of upstream the Latyan dam). J. watershed engineering and management.5: 134-143.

Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas, E., Mimikou, M. 2011. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. Ecological modeling, vol(222), 3500-3512pp.

Setegn, S.G., Srinivasan, R., Melesse, A.M., Dargahi, B. 2010. SWAT model application and prediction uncertainty analysis in the Lake Tana Basin, Ethiopia. Journal of Hydrological processes. 24: 357-367.

Spruill, C.A., Workman S.R., Taraba, J.L. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watershed using the SWAT model. Soil and Water Division of ASAE. No.98-05-109: 1431-1440.

Strauch, M., Bernhofer, Ch., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., Makeschin, F. 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. J. Hydrology, vol (414-415), 413-424pp.

Tang, F.F., Xu, H.S., Xu, Z.X. 2012. Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting. Procedia Environmental Sci. vol(13), 1760-1770pp.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop