

شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک) با استفاده از مدل SWAT

نسرین زلکی بدیلی^{۱*}، غلامعباس صیاد^۲، کاظم حمادی^۳، سمیرا اخوان^۴ و علی عبدی^۵

* نویسنده مسئول: دانش آموخته کارشناسی ارشد خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲- استادیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- عضو هیئت علمی سازمان آب و برق استان خوزستان

۴- استادیار گروه علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

۵- کارشناس ارشد خاکشناسی، گروه خاکشناسی، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۴/۸

چکیده

در ایران اکثر حوضه‌های آبخیز، بویژه حوضه‌های کوهستانی، فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری به تعداد کافی می‌باشند و گاهی ایستگاه‌ها برای طولانی مدت فاقد آمار هستند. به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های هیدرولوژیک کافی، مدل‌سازی حوضه‌ها نقش مهمی در توسعه منابع دارد. در مطالعه حاضر، توانایی مدل SWAT به منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه مارون در زیر حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک) بررسی شد. واسنجی و آنالیز حساسیت مدل با استفاده از برنامه SUFI-2 انجام پذیرفت. مدل با استفاده از اندازه‌گیری‌های شدت جریان در سال‌های ۲۰۰۶-۱۹۹۴ در ایستگاه ایدنک واسنجی و اعتبارسنجی گردید. در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، ضرایب R^2 ، NS، p-factor و d-factor در خروجی حوضه به ترتیب ۰/۶۳، ۰/۷۳، ۰/۵۹ و ۱/۲۳ و در مرحله اعتبارسنجی، مقادیر ۰/۷۰، ۰/۷۵، ۰/۶۷ و ۱/۰۵ به دست آمد. نتایج کلی شبیه‌سازی نشان داد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی شدت جریان رودخانه باشد.

کلیدواژه‌ها: رواناب، مدل SWAT، واسنجی، اعتبارسنجی، حوضه سد مارون (ایدنک)

مقدمه

خسارات ناشی از سیل را کاهش داد (عباسی، ۱۳۷۴). معمولاً انجام این مهم با توسل به مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی صورت می‌گیرد که با بهره‌مندی از روش‌های مختلف نظری میزان رواناب را برآورد می‌کنند.

در یک مدل هیدرولوژیکی که در آن امکان شبیه‌سازی کلیه فرایندهای یک سیستم و قوانین حاکم بر آن وجود دارد، تحلیل و پیش‌بینی واقع‌گرایانه میزان رواناب صورت می‌گیرد. اساس کار مدل‌های هیدرولوژیکی روابط بین بارش و رواناب حاصل از آن است و بدین

در ایران به دلیل کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه‌های آبخیز، هر گونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل مواجه می‌باشد؛ همچنین به علت عدم وجود آمار دقیق و کافی از آبدهی شاخه‌های فرعی رودخانه‌های اصلی، کلیه عملیات اجرایی در بستر رودخانه‌ها بر پایه حدس و گمان‌های تقریبی است (بابایی، ۱۳۸۸). در چنین شرایطی آگاهی از ویژگی‌های حوضه آبخیز و نحوه واکنش هیدرولوژیکی آن و برآورد دقیق میزان رواناب این امکان وجود خواهد داشت که ضمن کاهش هزینه‌ها، با اعمال مدیریت دقیق

اندازه‌گیری شده در حالت واسنجی و یا بدون واسنجی نشان داد. مطالعه‌ای که توسط کَنان و همکاران^۵ (۲۰۰۷) برای ارزیابی مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان‌های جاری ۱۴۲ هکتار حوضه آبخیز کولورث انجام شد، نشان داد شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، مدل تبخیر و تعرق و رشد محصولات انجام شده توسط مدل در مقایسه با داده‌های نهایی با اجزا رواناب در جریان سطحی، زهکش‌ها و جریان واقعی مطابقت خوبی داشتند و عملکرد مدل و مشاهدات پایه قابل قبول بود. عباسپور و همکاران^۶ (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی فرآیندهایی که روی کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی در حوضه رودخانه تور مؤثرند، از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی رواناب و نترات بسیار خوب و شبیه‌سازی رسوب و فسفر نسبتاً خوب بود. آنتجی و مارتین^۷ (۲۰۰۹) در مطالعه پیش‌بینی اثر تناوب شیوه‌های مدیریت روی کیفیت و کمیت آب با استفاده از مدل SWAT، نشان دادند که این مدل به کاربرد تناوب محصولات و در برخی موارد به تغییرات کوچک در شیوه‌های مدیریتی بسیار حساس است. از دیگر مطالعات انجام شده، ارزیابی اثر احداث تراس‌های انحرافی روی میزان رواناب و بار رسوبی در سطح حوضه آبخیز با استفاده از مدل SWAT می‌باشد که توسط یانگ و همکاران^۸ (۲۰۰۹) انجام گردید. نتایج نشان داد که مدل SWAT تغییرات فصلی بار آبی و بار رسوب سالانه را به خوبی پیش‌بینی کرد. همچنین مدل، روند تغییرات غلظت فسفر محلول را بخوبی پیش‌بینی کرد. پورعبداله (۱۳۸۴) در تحقیق خود مدل RUSLE و SWAT را برای حوضه امامه با هم مقایسه کرده و گزارش کرد SWAT از دقت بسیار بالاتری نسبت به RUSLE در مدلسازی فرسایش حوضه امامه برخوردار است.

منظور از معادلات ریاضی و همچنین خصوصیات حوضه آبخیز استفاده می‌کند. صحت و دقت داده‌های مورد نیاز مدل، نکته‌ای کلیدی در فرآیند مدل‌سازی بوده و مسلماً در صحت خروجی یک مدل که همان میزان رواناب می‌باشد، بسیار موثر است (عباسی، ۱۳۷۴).

مدل SWAT^۱ ابزاری است برای ارزیابی کیفیت و کمیت آب و خاک حوضه رودخانه یا آبخیز که توسط آرنولد در دهه ۹۰ برای سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا USDA – ARS توسعه یافته است. SWAT مدلی جامع و کامل است که برای ارزیابی دبی جریان، اثرات بلند مدت عملیات مدیریتی بر آب، رسوب و مواد شیمیایی حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در حوضه‌های بزرگ توسعه یافته است. در ایالات متحده آمریکا استفاده از مدل SWAT به عنوان ابزاری برای ارزیابی بسیاری از برنامه‌های حفاظتی مرحله‌ای و فشرده در سطوح حوضه‌های آبخیز بزرگ ارائه شده است.

در تحقیق واتسون و همکاران^۲ (۲۰۰۳) به منظور کاربرد SWAT در مدل‌سازی تعادل آبی حوضه آبخیز وودی یالوک^۳ در استرالیا، نشان داده شد که مقادیر رواناب تخمین زده شده و مشاهده شده سالانه و ماهانه در مرحله واسنجی مدل در طول سال‌های ۱۹۷۸ الی ۱۹۸۹ و اعتبارسازی مدل برای سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۰۱، مطابقت خوبی داشتند. بافوت و همکاران^۴ (۲۰۰۵) امکان استفاده از مدل SWAT را برای ارزیابی برنامه‌های زیست محیطی و حفاظتی در شرایطی که داده‌های واسنجی شده در دسترس نباشد، برای حوضه‌های میامی کریک و لانگ برنج در ایالت فلوریدا آمریکا مورد بررسی قرار دادند. آنها بعد از اجرای برنامه برای دو حوضه مذکور، داده‌های جریان در این حوضه‌ها را جمع‌آوری و مدل را با استفاده از این داده‌ها واسنجی کردند. نتایج مدل، تطابق خوبی را با داده‌های

5- Kannan *et al.*

6- Abbaspour *et al.*

7- Antje and Martin

8- Yang *et al.*

1- Soil and Water Assessment Tool

2- Watson *et al.*

3- Woody Yaloak

4- Baffaut *et al.*

روندیابی جریان می‌باشد. در این مدل هر حوضه به چند زیرحوضه و هر یک از زیرحوضه‌ها به چند واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU)^۲ که از نظر کاربری اراضی و خصوصیات خاک همگن هستند تقسیم می‌گردد. در ابتدا آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه عناصر غذایی، رسوب، رشد گیاهان و روش‌های مدیریتی برای هر واحد واکنش هیدرولوژیک و سپس برای هر زیرحوضه به صورت متوسط وزنی محاسبه می‌شود. در مدل SWAT ابتدا از روی DEM، حوضه آبریز اصلی به تعدادی زیر حوضه تقسیم می‌شود؛ سپس بر مبنای نقشه‌های خاک و کاربری اراضی زیرحوضه‌ها نیز به واحدهای کوچکتری تقسیم می‌شوند، که به هر کدام از این واحدها یک HRU می‌گویند. چرخه هیدرولوژی که به وسیله SWAT شبیه‌سازی می‌شود بر پایه رابطه بیلان آبی است:

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

که در آن: SW_t = مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 = مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} = مقدار بارندگی 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 آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیر اشباع در روز i ام وارد می‌شود (میلی‌متر)، Q_{gw} = مقدار جریان برگشتی در روز i ام (میلی‌متر).

داده‌های ورودی مدل SWAT2005

به‌طور کلی براساس فرمت داده‌ها، اطلاعات مورد نیاز برای شبیه‌سازی به سه دسته تقسیم می‌گردند که عبارتند از لایه‌های اطلاعاتی، پارامترهای ورودی که به صورت عددی وارد می‌گردد و فایل‌های اطلاعاتی که به صورت dbf یا txt تهیه می‌گردند.

هدف از این پژوهش، بررسی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی میزان رواناب در حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک) بود. دلیل انتخاب مدل SWAT کوهستانی بودن و کمبود ایستگاه هیدرومتری با توجه به وسعت منطقه بود. از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم بسیاری از پارامترها در مقیاس حوضه‌ای مشکل و یا حتی امکان‌پذیر نمی‌باشد، ضروری است مدل برای حوضه واسنجی گردد. در این پژوهش آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از برنامه SUFI-2^۱ در نرم‌افزار swat-cup و آمار مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری ایدنک انجام گردید.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه تحقیق

حوضه آبخیز سد مارون یکی از زیرحوضه‌های رودخانه مارون-جراحی است که در جنوب غرب ایران قرار دارد و در محدوده جغرافیایی ۰۵-۵۰° الی ۱۱-° ۵۱° طول شرقی و ۳۹-۳۰° الی ۲۱-۳۱° عرض شمالی جغرافیایی واقع شده است. رودخانه مارون توسط سرشاخه‌های سقاوه، لوراب، شور و چاروساق از ارتفاعات زاگرس سرچشمه گرفته و با مساحتی حدود ۲۷۵۰ کیلومتر مربع در ایستگاه هیدرومتری ایدنک اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل مفهومی-نیمه توزیعی در مقیاس حوضه‌ای است که دارای بازده محاسباتی بالا می‌باشد. این مدل یک مدل پیوسته زمانی است که در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و یا طولانی مدت تر اجرا می‌شود. مدل با تقسیم کردن یک حوضه به تعداد زیادی زیرحوضه جزئیات مکانی را شبیه‌سازی می‌کند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاهان، عناصر غذایی، آفت‌کش‌ها، مدیریت اراضی و

اختیاری جبران کنند. برنامه SUFI-2 واسنجی و عدم قطعیت را ترکیب می‌کند و سعی می‌کند پارامترهای عدم قطعیت را به نحوی پیدا کند که اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده در ناحیه عدم قطعیت تخمین قرار گیرند، در حالی که کوچکترین طیف عدم قطعیت تخمین ممکن را ایجاد می‌کند.

در برنامه SUFI-2 فرض می‌شود که هر پارامتر ناشناخته به طور یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. حد بالا و پایین این دامنه را می‌توان بر اساس تجربیات، آزمایش‌ها و یا اندازه‌گیری‌های انجام شده در مطالعات قبلی و منابع علمی انتخاب نمود. عدم قطعیت خروجی مدل به وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد که در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد توزیع تجمعی^۳ متغیر خروجی که با روش لاتین هایپرکیوب از دامنه مذکور نمونه‌برداری می‌شود، محاسبه می‌گردد (آتوود و همکاران^۴، ۲۰۰۴).

در برنامه SUFI-2 یک دامنه بزرگ عدم قطعیت برای هر پارامتر فرض می‌شود. بنابراین در ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح^۵ ۹۵ ppu (۹۵ درصد محدوده عدم قطعیت پیش‌بینی) قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی کاهش می‌یابد تا دو شرط زیر برقرار شود:

۱- اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ ppu واقع شوند
(p-factor).

۲- فاصله متوسط بین حد بالا و حد پایین ۹۵ درصد تا حد ممکن کوچک شود (d-factor).

مفهوم عدم قطعیت الگوریتم SUFI-2 در شکل ۲ آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که پارامتر با مقدار واحد باعث ایجاد یک نتیجه واحد برای مدل می‌شود (شکل ۲a). در صورتی که انتشار عدم قطعیت

الف: لایه‌های اطلاعاتی شامل لایه رقمی ارتفاعی یا DEM، لایه شبکه آبراهه‌ها، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک‌شناسی.

ب: پارامترهای ورودی شامل هواشناسی، خاکشناسی، مشخصات رودخانه‌ها، پارامترهای موثر در تعیین رواناب سطحی و پارامترهای موثر در شبیه‌سازی فرسایش می‌باشد.

ج: فایل‌های ورودی: این فایل شامل داده‌های هواشناسی روزانه شامل بارش و درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه می‌باشند. پارامترهای هواشناسی ماهانه شامل متوسط و انحراف معیار درجه حرارت حداقل و حداکثر، متوسط، انحراف معیار و ضریب چولگی مقدار بارش، احتمال یک روز تر به دنبال یک روز خشک، متوسط درجه شبنم و متوسط سرعت باد برای هر ماه می‌باشد (نیچ و همکاران^۲، ۲۰۰۵). مشخصات ایستگاه‌هایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند مطابق جدول شماره ۱ می‌باشند.

اجرای مدل

جهت دستیابی به نتایج بهتر اطلاعات با دقت تهیه و به مدل معرفی شد. پس از تکمیل این اطلاعات مدل اجرا شد. حوضه آبخیز سد مارون به ۲۳ واحد واکنش هیدرولوژیک (HRU) تقسیم شد. از نرم‌افزار SWAT CUP و از الگوریتم SUFI-2 جهت انجام واسنجی و اعتبارسنجی استفاده گردید.

تحلیل عدم قطعیت

تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یکی از اجزای مهم در توسعه و اجرای مدل‌های کامپیوتری برای ارزیابی محیط زیست می‌باشد. فهم کامل عدم قطعیت و علل آن برای تفسیر مؤثر پیش‌بینی‌های مدل لازم است. در صورت عدم این فهم، کاربران مدل برای استفاده عملی از مدل‌ها باید بعضی از خطاها و عیوب مدل ریاضی را از طریق اصلاح مدیریت و تغییر پارامترها به صورت تصادفی و

3- Cumulative distribution

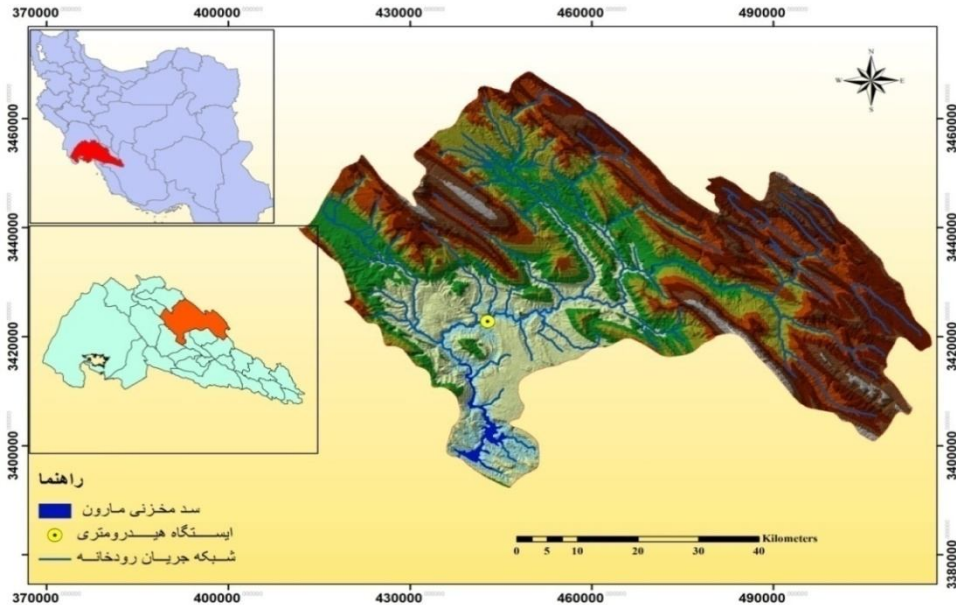
4- Attwood *et al.*

5- percent prediction uncertainty

1- Digital Elevation Map

2- Neitsh *et al.*

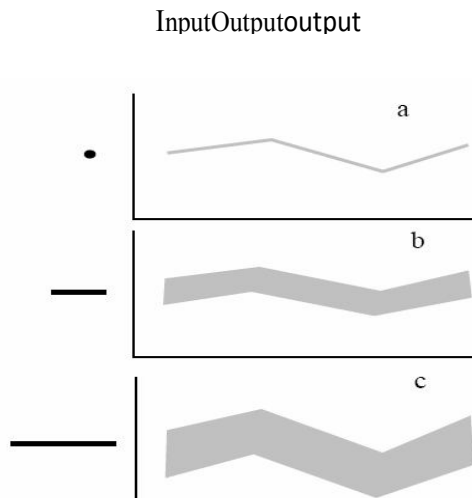
در پارامتر باعث ایجاد ناحیه‌ای از جواب می‌شود (شکل ۲b). هنگامی که عدم قطعیت پارامترهای ورودی افزایش می‌یابد، عدم قطعیت خروجی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲c).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سد مارون (ایدنک)

جدول شماره ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در تحقیق

نام ایستگاه	طول شرقی (درجه-دقیق)	عرض شمالی (درجه-دقیقه)	ارتفاع (متر)	دوره آماری	نوع ایستگاه
ایدنک	۵۰° - ۲۵'	۳۰° - ۵۷'	۵۶۰	۱۹۸۷-۲۰۰۶	بارانسنج ثبات
دهنو	۵۰° - ۵۳'	۳۰° - ۵۹'	۱۴۰۰	۱۹۹۶-۲۰۰۶	بارانسنج معمولی
ایدنک	۵۰° - ۲۴'	۵۰° - ۵۶'	۵۶۰	۱۹۸۷-۲۰۰۶	هیدرومتری



شکل ۲- مفهوم عدم قطعیت برنامه SUFI-2

تحلیل حساسیت و واسنجی مدل

حساسیت هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز بر حسب شرایط و ویژگی‌هایشان، در برابر یک پارامتر خاص کاملاً متفاوت است. میزان تغییر خروجی مدل به ازای تغییر در میزان ورودی‌های مدل را آنالیز حساسیت گویند. تحلیل حساسیت شامل وارد کردن یک دامنه از مقادیر برای ورودی‌های خاص و مشاهده تغییرات در مقادیر خروجی مدل است.

متغیری که تغییرات کم آن باعث تغییرات زیادی در خروجی مدل می‌شود، متغیر حساس نامیده می‌شود. به دلیل تأثیر زیاد این نوع از متغیرها بر خروجی‌های مدل، توجه زیادی در محاسبه و اندازه‌گیری آنها باید صورت گیرد. تحلیل حساسیت روش مناسبی برای تعیین رفتار مدل در مقابل ورودی‌های آن می‌باشد. پارامترهای فراوانی در نتایج مدل دخالت دارند و لازم است پارامترهایی که خروجی مدل به دقت آن‌ها حساسیت بیشتری دارد مشخص شوند (آنالیز حساسیت) و در واسنجی مدل، تنها از این پارامترها استفاده شود. در ابتدا چون حد مناسبی برای پارامترها در دسترس نیست، لازم است پارامترهای حساس بر اساس تجربیات و اندازه‌گیری انجام شده در مطالعات قبلی انتخاب شوند. سپس چند تکرار انجام شده تا دامنه پارامترها تعدیل گردد و یک دامنه مناسب، تا حد ممکن کوچک و نزدیک به واقعیت برای هر پارامتر به دست آید. از آنجا که این پارامترها نقش مهمی در خروجی مدل ایفا می‌کنند، باید تا حد ممکن این دامنه بزرگ انتخاب شود. در این مطالعه از برنامه SUFI استفاده گردید. برنامه SUFI با فرض عدم قطعیت بزرگ پارامترها (انتخاب دامنه بزرگ برای هر پارامتر) آغاز شد. در این مرحله تحلیل حساسیت مدل با استفاده از ۲۰ سال آمار دبی ماهانه رودخانه مارون در حوضه آبخیز سد مارون مربوط به سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۶ اندازه‌گیری شد در ایستگاه هیدرومتری ایدنک انجام گردید. مهم‌ترین

پارامترهای به کار رفته در مدل و محدوده تغییرات آنها در جدول (۲) آورده شده‌اند.

دامنه پارامترها پس از هر تکرار اصلاح شد و عدم قطعیت پارامترها در هر مرحله کاهش یافت. نتایج آنالیز حساسیت در جدول (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که از نتایج این جدول بر می‌آید، عمده تغییرات به منظور واسنجی شدت جریان شامل تغییر در شماره منحنی رواناب (CN)، مقدار رطوبت خاک (AWC)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بوده است.

بعد از اجرای آنالیز حساسیت مرحله واسنجی آغاز شد. واسنجی در واقع فرایندی است که در آن تخمین اولیه پارامترها تعدیل می‌گردد، به طوری که بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده‌ای بهترین برازش ایجاد گردد. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده جریان متوسط ماهانه سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۶ واسنجی مدل انجام گردید (۱۹۹۳-۱۹۸۷ به عنوان warm up در نظر گرفته شد). به منظور تجزیه و تحلیل کیفیت نتایج مدل، از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2) و ضریب ناش-ساتکلیف (NS) استفاده گردید. ضریب تبیین بیان‌کننده بخشی از کل واریانس مقادیر مشاهده‌ای است که توسط مقادیر شبیه‌سازی شده توجیه می‌شود. به عبارت دیگر، قسمتی از واریانس کل می‌باشد که به وسیله رابطه خطی موجود بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توجیه می‌گردد. ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است.

$$R^2 = \frac{[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

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.

جدول ۲ - پارامترهای بکار رفته در مدل SWAT و محدوده تغییرات این پارامترها

ردیف	پارامتر	حد بالا	حد پایین	توضیحات
۱	r_CN2.mgt	۰/۴۱	-۰/۵۶	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی II
۲	v_ALPHA_BF.gw	۰/۰۹۹	۰/۰۳	ثابت کاهش جریان پایه
۳	v_GW_DELAY.gw	۴۹/۹۳	۳۹/۲۹	زمان تاخیر برای تغذیه آبخوان
۴	v_CH_N2.rte	۰/۰۴	-۰/۰۳	ضریب مانینگ برای جریان در کانال اصلی
۵	v_CH_K2.rte	۱/۵۶	۰/۲۸	هدایت هیدرولیکی موثر در کانال اصلی
۶	v_ALPHA_BNK.rte	۰/۶۹۸	۰/۰۹	ضریب آلفا جریان پایه
۷	r_SOL_AWC.sol	۰/۲۹	۰/۵/۰	متوسط آب قابل استفاده (میلی متر بر میلی متر)
۸	r_SOL_K.sol	۰/۰۳۶	۰/۵۳۰	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (میلی متر بر ساعت)
۹	r_SOL_BD.sol	۰/۰۴۶	-۰/۰۱۸	جرم مخصوص ظاهری خاک
۱۰	v_SFTMP.bsn	۰/۶۱۴	-۰/۱۶۱	دمای بارش برف (سانتی گراد)

* (V و T کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای پارامتر به کار برده می شود را تعیین می کنند. V به این معنی است که مقدار پارامتر با مقدار جدید جایگزین شود و T به این معنی است که پارامتر در مثبت یا منفی مقدار داده شده ضرب شود.)

جدول ۳: نتایج تحلیل حساسیت مدل

ردیف	پارامتر	درجه حساسیت
۱	CN2	۱
۲	r_SOL_AWC.sol	۲
۳	r_SOL_K.sol	۳
۴	v_ALPHA_BNK.rte	۴
۵	v_SFTMP.bsn	۵
۶	v_GW_DELAY.gw	۶
۷	v_ALPHA_BF.gw	۷
۸	v_CH_N2.rte	۸
۹	v_CH_K2.rte	۹
۱۰	r_SOL_BD.sol	۱۰

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Measured_i - Simulated_i)^2}{\sum_{i=1}^n [Measured_i - 1/n \sum_{i=1}^n Measured_i]^2} \quad (3)$$

تا کنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای این پارامترها ارائه نشده است. اما گاسمن و همکاران^۱ (۲۰۰۷) با بررسی جامع تعداد بسیار زیادی از مطالعات انجام گرفته، با استفاده از مدل SWAT اظهار

مقدار NS اختلاف نسبی مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی شده را نشان می دهد. راندمان NS به عنوان تابع هدف در هنگام واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مقدار آن از منفی بی نهایت تا یک متغیر است. اگر میزان آن از ۰/۵ بیشتر باشد، مدل شبیه سازی خوبی داشته است و در صورت منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده ای استفاده گردد.

کرد به این دلیل که در مدل SWAT درصد تراکم پوشش گیاهی ذکر نشده و فقط به نوع پوشش اشاره شده است. افزایش تراکم پوشش گیاهی باعث افزایش برگاب شده که این موضوع باعث کاهش رواناب شبیه‌سازی شده می‌شود. از جمله دلایل دیگر ضعف مدل می‌توان به فقدان ایستگاه هواشناسی و معرف نبودن ایستگاه‌های مورد استفاده در مدل اشاره کرد. برای بررسی دقت مدل، نمودار مقادیر جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهداتی نسبت به هم رسم گردیده و مقدار ضریب R^2 و معادله رگرسیون خطی را برای سال‌های مورد نظر محاسبه شده است. مقدار این ضریب، توافق نسبی را بین مقادیر محاسباتی مشاهداتی در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد (شکل (۴) و (۶)).

احتمال قطعیت داده‌ها بین ۹۲/۵٪ تا ۹۷/۵٪ تعیین و باند عدم قطعیت مورد نظر دبی شبیه‌سازی شده طبق نمودار شکل‌های ۳ و ۵ برای ایستگاه ایدنک تعیین و ارائه گردید. از آنجا که نمودار دبی مشاهده‌ای ایستگاه و شبیه‌سازی شده در داخل باند ۹۵ درصد عدم قطعیت قرار گرفته است، نتایج خروجی مدل با خطای قابل قبولی به دست آمده است. پارامترهای بررسی دقت شبیه‌سازی مدل نیز در جداول ۴ و ۵ آمده است. در مجموع، نتایج مدل در محدوده قابل قبول ارزیابی می‌گردند.

اعتبارسنجی

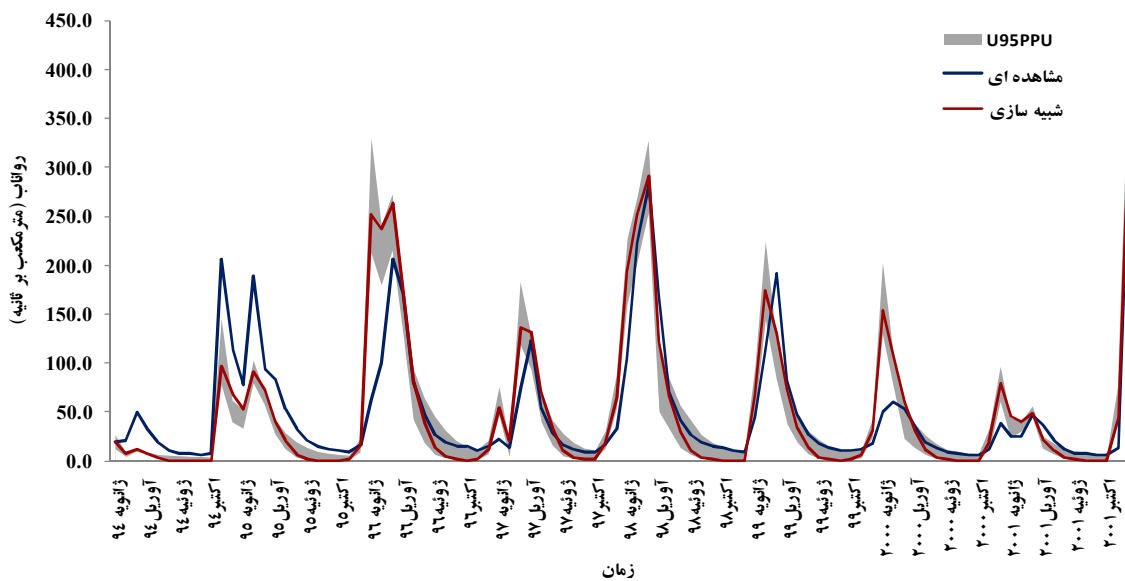
برای اعتبارسنجی مدل از مقادیر مشاهده‌ای و نتایج مدل در سال‌های ۲۰۰۶ - ۲۰۰۲ استفاده گردید (شکل ۵). نتایج برازش مدل در دوره اعتبارسنجی تا حدودی نسبت به دوره واسنجی افزایش یافته است. شاخص‌های ارزیابی مدل در مرحله اعتبارسنجی در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

می‌دارند که برای مقیاس زمانی ماهانه، بهتر است مقادیر NS از ۵۰ درصد باشد (هراتی و ناش^۱، ۱۹۹۸).

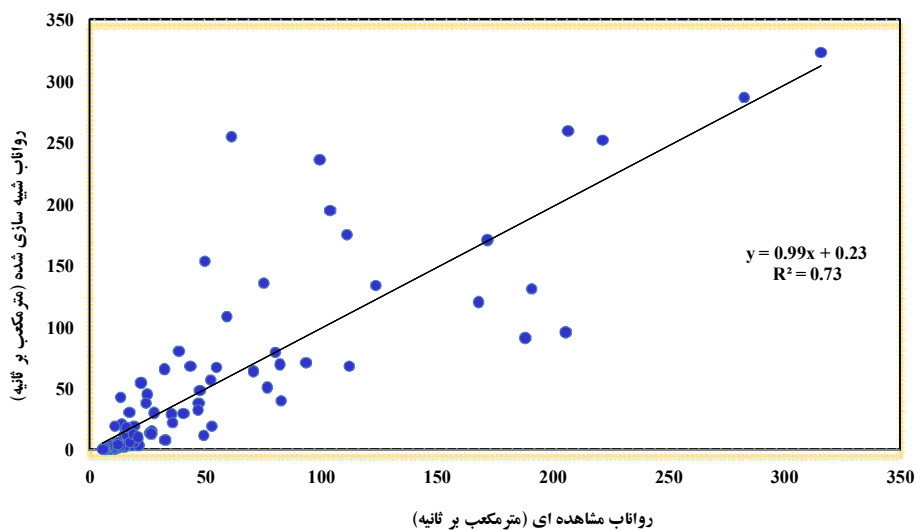
نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل، همبستگی مناسب شبیه‌سازی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده شدت جریان رودخانه مارون در ایستگاه هیدرومتری ایدنک را نشان داد. با مراجعه به شکل ۳ مشخص می‌شود، روند شبیه‌سازی مدل با مقادیر مشاهده‌ای همخوانی دارد. نتایج در اکثر نقاط انطباق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد ولی در بین ماه‌های فوریه تا مه (اسفند تا اواخر اردیبهشت) انطباق چندانی ندارد. دلیل این امر را می‌توان این گونه شرح داد که مدل توانایی شبیه‌سازی دقیق دبی‌های اوج رودخانه را ندارد که این موضوع در تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز ملاحظه شده است. برای این ضعف دلایلی ذکر شده که از مهم‌ترین، می‌توان به ضعف مدل در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف اشاره کرد (بابایی، ۱۳۸۸؛ وانگ و ملس^۲، ۲۰۰۵). این موضوع در مناطق کوهستانی از اهمیت بیشتری برخوردار است. با توجه به کوهستانی بودن منطقه مورد مطالعه می‌توان علت عدم انطباق را نبود شبیه‌سازی دقیق فرایند ذوب برف در کوهستان‌های واقع در سرچشمه رودخانه نسبت داد. اخوان و همکاران^۳ (۲۰۱۰) و رستمیان (۱۳۸۷) گزارش کردند که اکثر جریان‌هایی که مدل قادر به شبیه‌سازی آنها نبوده، در فصل بهار اتفاق می‌افتد. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه در فصل بهار می‌توان نتیجه گرفت که مدل قادر به شبیه‌سازی کامل ذوب برف در مناطق کوهستانی نبوده و مقدار حداکثر رواناب را خوب شبیه‌سازی نمی‌کند. از جمله دلایل دیگر ضعف مدل، می‌توان نقشه پوشش گیاهی را ذکر

1- Haratti and Nash
2- Wang and Melesse
3- Akhavan *et al.*



شکل ۳: نتایج واسنجی مدل در ایستگاه ایدنک

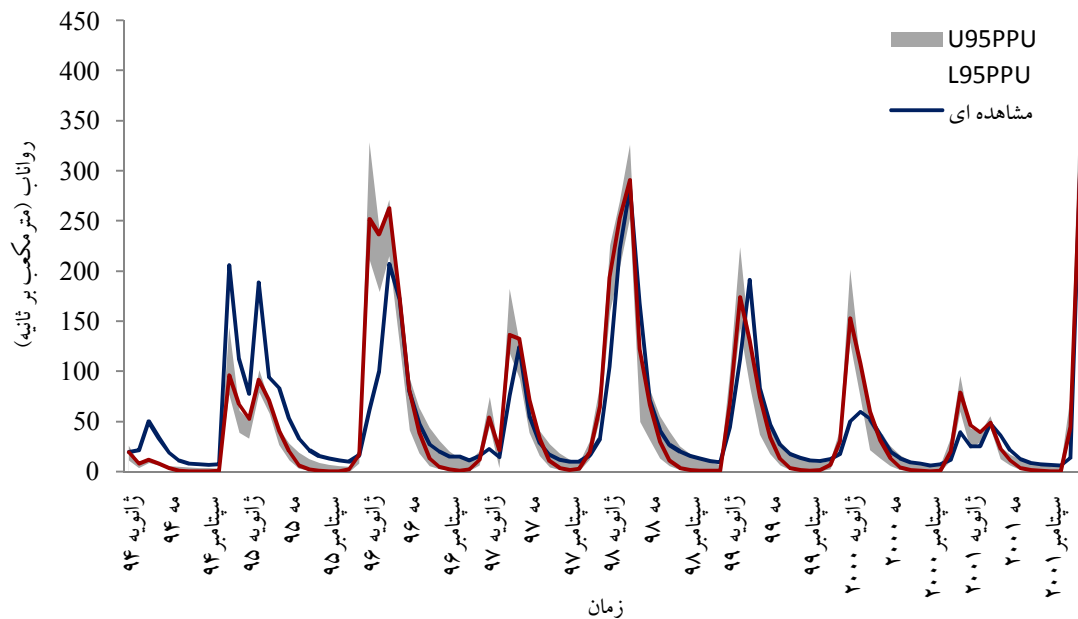


شکل ۴: مقایسه مقادیر رواناب مشاهده‌ای با رواناب شبیه سازی شده در مرحله واسنجی

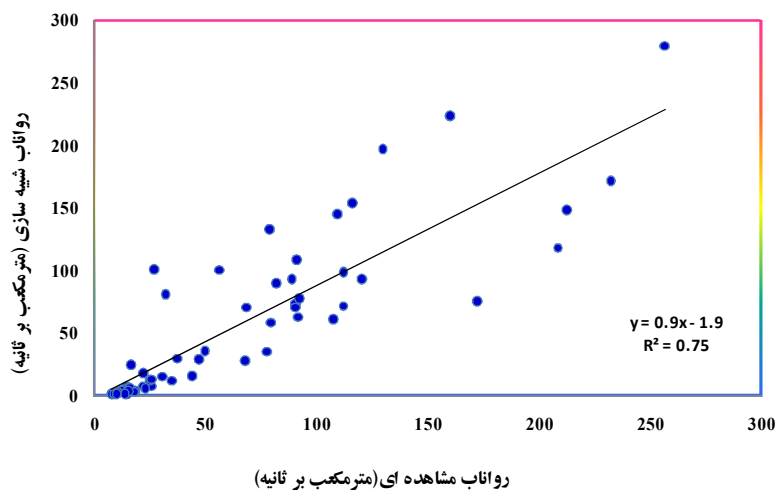
جدول ۴: نتایج آماری مدل در مرحله واسنجی

ایستگاه	طول دوره آماری	R^2 (درصد)	NS (درصد)	d-factor	p-factor
ایدنک	۱۹۹۴-۲۰۰۱	۰/۷۳	۰/۶۳	۱/۲۳	۰/۵۹

زلکی بدیلی و همکاران: شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز...



شکل ۵: نتایج اعتبارسنجی مدل در ایستگاه ایدنک



شکل ۶: مقایسه مقادیر رواناب مشاهده‌ای با رواناب شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

جدول ۵: نتایج آماری مدل در مرحله اعتبارسنجی

ایستگاه	طول دوره آماری	R^2 (درصد)	NS (درصد)	d-factor	p-factor
ایدنک	۲۰۰۱-۲۰۰۶	۰/۷۵	۰/۷۰	۱/۰۵	۰/۶۷

نتیجه گیری

به دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسائل، ابزار مناسبی برای مدیریت اراضی در جهت کاهش رواناب و رسوب می باشد. هیدرولوژیست ها و مدیران اجرایی با استفاده از این مدل می توانند سناریوهای مختلف مدیریتی را در زمان کوتاه و بدون صرف هزینه زیاد مورد ارزیابی قرار داده و بهترین تصمیم را اتخاذ نمایند.

مدل SWAT با استفاده از دبی جریان متوسط ماهیانه در ایستگاه هیدرومتری ایدنک واسنجی و اعتبارسنجی گردید که نتایج آن رضایت بخش بود. هدف اولیه این تحقیق، شبیه سازی رواناب حوضه سد مارون (ایدنک) برای ایستگاه ایدنک بود. این حوضه کوهستانی بوده و پتانسیل تولید رواناب و رسوب زیادی دارد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری دفتر تحقیقات و استانداردهای شبکه های آبیاری و زهکشی شرکت سهامی سازمان آب و برق خوزستان تشکر و قدردانی به عمل می آید.

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی مناسب جهت تعیین مقادیر رواناب حوضه می باشد. استفاده از این مدل به دلیل کوهستانی بودن، کمبود ایستگاه هیدرومتری، و به ویژه

منابع

- ۱- بابایی، ا. ۱۳۸۸. ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده رود. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۱۸ (۳): ۴۱-۵۸.
- ۲- عباسی، علی اکبر، ۱۳۷۴. کاربرد GIS در مطالعات سیل، دومین کنفرانس سیستم های اطلاعات جغرافیایی، سازمان نقشه برداری کشور، اردیبهشت ۱۳۷۴.
- ۳- رستمیان، ر. ۱۳۸۷. کاربرد مدل SWAT 2000 در تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت آباد از زیر حوضه های کارون شمالی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. شماره ۴۸، ۵۳۷-۵۱۷.
- ۴- پورعبداله، م. ۱۳۸۴. مقایسه مدل های SWAT و RUSLE در تخمین فرسایش حوضه ای. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران محیط زیست، دانشگاه صنعتی شریف.
- 5- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. 2007. Modeling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413– 430.
- 6- Akhavan, S., Abedi, K.J., Musavi, F., Afyuni, M., Eslamian, S., and Abbaspour, K.C. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139 (4): 675-688.
- 7- Antje.U., and Martin, V. 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agricultural Water Management*, 96: 1207-1217.

- 8- Attwood, J. D., McCarl, B., Chen, C.C., Eddleman, B.R., Nayda, B., and Srinivasan, R. 2000. Assessing regional impacts of change: linking economic and environmental models. *Agricultural Systems*, 63(3): 147-159.
- 9- Baffaut, C., Farrand, T., and Beson, V. 2005. Potential accuracy of water quality estimates based on non-calibration SWAT simulation. Food and Agricultural Policy Research Institute University of Missouri, Columbia.
- 10- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., and Arno, J.G. 2007. SWAT: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of ASABE*, 50:4. 1211-1250.
- 11- Haratti, M.P., and Nash, J.E. 1998. Water Quality simulation modeling and uncertainly analysis for risk assessment. *Ecological Modeling*, 72: 1-20.(28).
- 12- Kannan, N., White, S. M., Worrall, F., and Whelan, M. 2007. Hydrology calibrating modeling of a small catchment using SWAT-2000- Ensuring correct flow partitioning for contaminant modeling. *Journal of Hydrology*, 334: 64-72.
- 13- Neitsh, S. L., Arnold, J., Srinivasan, J. R., and King, K. W. 2005. Soil and Water Assessment Tool: User Manual (Draft), Black land Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- 14- Yang, Q., Meng, F. R., Zhao, Z., Chow, T. L., Benoy, G., Rees, H. W., Bourque, C. P. A. 2009. Assessing the impact of flow diversion terraces on stream water and sediment yields at a watershed level using SWAT model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 132: 23-31.
- 15- Wang, X., and Melesse, A. M. 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the ASABE*. 48: 1-18.
- 16- Watson, B., Ghafouri, M. M., and Selvalingam, S. 2003. Application of SWAT to model the water balance of the Woody Yaloak river catchment. 2nd International SWAT Conference Proceeding. Bari Italy. July, 1-4.