



Simulation of runoff and sediment yield using SWAT in Gawshan dam watershed

Sahar Aminkhah¹, Mohammad Ali Mahmoodi^{2✉}, Aref Bahmani³, Golaleh Ghaffari⁴

1. Department of Soil Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: saharaminkhah@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: m_mahmoodi81@yahoo.com
3. Department of Watershed Management and Natural Resources, Forest, Range and Watershed Management Organization, Sanandaj, Iran, Email: bahmani.aref@yahoo.com
4. Department of Watershed Management, Islamic Azad University, Sanandaj branch, Iran, Email: ghaffari58@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Sep. 3, 2022

Revised: Feb. 17, 2023

Accepted: Apr. 25, 2022

Published online: May. 22, 2023

Keywords:

SWAT,
Runoff,
Sediment,
Gawshan

ABSTRACT

Soil erosion by water is a global threat to the environment which negatively affects soil and water quality. Soil erosion modeling is an efficient method to simulate soil erosion, to identify sediment source areas, and to evaluate soil conservation measures. In this study the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used to model runoff and sediment in Gawshan dam watershed in west of Iran. For this purpose, climatic data obtained from a period of 11 years, from January 1, 2005 to the end of December 2015, from the stations of Bavale, Ravansar, Sanghor, Ghorve, Sanandaj, Kermanshah, Kangavar and Kamiyaran were used. We used two different approaches for estimating of model parameters. In the forward deterministic approach model parameters were independently derived from digital elevation model (DEM), soil and land use maps and climate data, whereas in the inverse stochastic approach model calibration were performed by sensitive model parameters using Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2), which is one of the programs interfaced with SWAT, in the package SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Programs). Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R²) and Nash-Sutcliffe efficiency (NS) for forward approach and P factor and R factor for inverse approach. Results showed that in the forward approach, based on monthly data (2008-2013), the model performance was satisfactory for runoff (R²=0.66; NS=0.63) and fair for sediment (R²=0.42; NS=0.3). However, model prediction improved for both runoff (R²=0.94; NS=0.83) and sediment (R²=0.61; NS=0.53) when they were averaged on monthly basis. Calibration of the model parameters improved its performance for runoff (P factor>0.6; R factor<1) and sediment (P factor>0.4; R factor <1). These results demonstrated that the SWAT has the potential to be used as a decision making tool for Gawshan dam watershed management.

Cite this article: Aminkhah, S., Mahmoodi, M. A., Bahmani, A., & Ghaffari, G. (2023) Simulation of runoff and sediment yield using SWAT in Gawshan dam watershed, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (3), 441-454. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348170.669348>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348170.669348>



شبیه‌سازی میزان رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز سد گاوشان

سحر امین‌خواه^۱، محمدعلی محمودی^۲✉، عارف بهمنی^۳، گلاره غفاری^۴۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، ایمیل: saharaminkhah@gmail.com۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، ایمیل: m_mahmoodi81@yahoo.com

۳. آبیاری و زهکشی، سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان کردستان، سنندج، ایران، ایمیل:

bahmani.aref@yahoo.com۴. گروه آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران، ایمیل: ghaffari58@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

فرسایش آبی یک تهدید جهانی برای محیط‌زیست به شمار می‌رود که آثار سوئی بر کیفیت خاک و آب دارد. مدل های فرسایش خاک ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی فرسایش خاک، شناسایی نواحی مستعد فرسایش و نیز ارزیابی برنامه‌های عملیات حفاظت خاک می‌باشند. در این مطالعه از ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه آبخیز سد گاوشان در غرب ایران استفاده شد. بدین منظور از داده‌های اقلیمی بدست آمده از یک دوره زمانی ۱۱ ساله، از اول ژانویه ۲۰۰۵ تا آخر دسامبر ۲۰۱۵، از ایستگاه‌های باوله، روانسر، سنقر، قروه، سنندج، کرمانشاه، کنگاور و کامیاران استفاده شد. همچنین دو روش متفاوت برای برآورد پارامترهای مدل بکار گرفته شدند. در روش مستقیم، که یک روش دترمینستیک (قطعی) بود، پارامترهای مدل بطور مستقل از نقشه‌های رقومی ارتفاع (DEM)، خاک، کاربری اراضی و نیز داده‌های اقلیمی برآورد شدند؛ در حالیکه در روش معکوس، که یک روش استوکاستیک (تصادفی) بود، مدل با استفاده از پارامترهای حساس آن به کمک روش SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP واسنجی گردید. کارایی مدل در روش مستقیم با استفاده از ضرایب تبیین (R²) و نش-ساتکلیف (NS) و در روش معکوس با استفاده از P فاکتور و R فاکتور ارزیابی شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که در روش مستقیم، بر اساس داده‌های ماهانه (۲۰۰۸-۲۰۱۳)، کارایی مدل برای رواناب رضایت‌بخش (R²=۰/۶۶؛ NS=۰/۶۳) و برای رسوب نسبتاً خوب (R²=۰/۴۲؛ NS=۰/۳) بود. با اینحال، هنگامی که این داده‌ها در مقیاس ماهانه (میانگین روزهای هر ماه) میانگین‌گیری شدند، نتایج پیش‌بینی مدل برای رواناب (R²=۰/۹۴؛ NS=۰/۸۳) و رسوب (R²=۰/۶۱؛ NS=۰/۵۳) بهبود یافت. همچنین واسنجی پارامترهای مدل کارایی مدل را برای رواناب (P>۰/۶ فاکتور؛ R<۱) و رسوب (P>۰/۴ فاکتور؛ R<۱) افزایش داد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که مدل SWAT از قابلیت مطلوبی برای تصمیم‌گیری در مدیریت حوضه آبخیز سد گاوشان برخوردار است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۳/۱

واژه‌های کلیدی:

رسوب،

رواناب،

گاوشان،

مدل SWAT.

استناد: امین‌خواه؛ سحر، محمودی؛ محمدعلی، بهمنی؛ عارف، غفاری؛ گلاره، (۱۴۰۲). شبیه‌سازی میزان رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز سد

گاوشان، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴ (۳)، ۴۵۴-۴۴۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348170.669348>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.348170.669348>

مقدمه

امروزه فرسایش خاک یکی از مهمترین مشکلات زیست‌محیطی است که پیامدهای سوء اقتصادی و اجتماعی نیز به دنبال دارد. فرسایش خاک به‌عنوان خطری جدی برای سلامت انسان و سایر موجودات زنده محسوب می‌شود و در مناطقی که کنترل نمی‌شود نه‌تنها خود خاک را از بین برده و یا حاصلخیزی آن را کاهش می‌دهد، بلکه با رسوب مواد در آبراهه‌ها، مخازن، دریاچه سدها و بندرها سبب کاهش ظرفیت آبیگری آن‌ها شده و در نتیجه عمر مفید آن‌ها را کم می‌کند (Morgan & Nearing, 2011).

فرسایش خاک در قاره آسیا بیشتر از سایر قاره‌ها است و ایران نیز از این نظر در قاره آسیا وضعیت مطلوبی ندارد (Dregne, 1992; FAO, 1994). بر مبنای مطالعات انجام شده توسط Ahmadi et al. (2003) میانگین سالیانه فرسایش خاک در ایران در حدود ۲۵۰۰ تن بر کیلومتر مربع است که در حدود ۴/۳ برابر بیشتر از متوسط جهانی است. (Mohammadi et al. (2018) این مقدار را در حدود ۲۴۰۰ تن در هکتار در سال برآورد کرده‌اند. بعلاوه اطلاعات موجود نشان می‌دهند که ۵۹ درصد از ۱۷ حوضه آبخیز بزرگ شناخته شده در ایران به شدت دچار تخریب شده‌اند (Ahmadi et al., 2003; Rostamian et al., 2008).

اکثر آبخیزهای کشور ما، به‌ویژه آبخیزهای کوهستانی و صعب‌العبور، فاقد ایستگاه‌های اندازه‌گیری رواناب و رسوب به میزان موردنیاز هستند. از آنجاکه آمار و اطلاعات این ایستگاه‌ها برای برنامه‌های حفاظتی و مدیریت حوضه آبخیز مورد نیاز است، شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی این آبخیزها راه‌حل بهینه‌ای برای این فقدان است و غالباً تنها روش عملی ارزیابی تغییرات کاربری اراضی و سناریوهای مدیریتی می‌باشند (Fohrer et al., 2001; Arabi et al., 2007; Behera & Panda, 2006; Ahl et al., 2008). لذا مدل‌سازی فرایندهای مختلف در حوضه‌های آبخیز برای مدیریت آن‌ها بسیار ضروری است.

در سال‌های اخیر مدل‌های ریاضی مختلفی در زمینه فرایندهای هیدرولوژی و انتقال رسوب در حوضه‌های آبخیز ایجاد شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی از مهمترین این مدل‌ها عبارتند از مدل‌های متعلق به خانواده معادله جهانی فرسایش خاک (USLE, RUSLE و ...)، پروژۀ پیش‌بینی فرسایش خاک (WEPP) و ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT). در این میان مدل SWAT یکی از مناسب‌ترین مدل‌ها است که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی و حفاظت از منابع طبیعی وزارت کشاورزی آمریکا و دانشگاه ای‌اند‌ام تگزاس^۱ توسعه یافت (Borrelli et al., 2021; Panagos & Katsoyiannis, 2019). از مزایای این مدل آن است که در حوضه‌های فاقد داده‌های برداشت‌شده نیز قابل کاربرد است؛ به کمک آن تأثیر نسبی عوامل مختلف (مانند روش‌های مختلف مدیریتی، آب و هوا، پوشش گیاهی و ...) بر روی کیفیت آب، تولید رسوب و بار آلاینده‌ها در حوضه‌های آبخیز قابل کمی کردن می‌باشند؛ از پارامترهای ورودی آسان و قابل دسترس استفاده می‌کند و کاربر را قادر به مطالعه بلندمدت تأثیرات می‌کند. همچنین شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده با شیوه‌های مختلف مدیریتی بدون صرف زمان و هزینه‌ی زیاد با آن قابل اجرا است (Neitsch et al., 2005).

مدل SWAT در آبخیزهای سرتاسر جهان در شرایط مختلف مدیریتی با موفقیت بکار گرفته شده است. به عنوان مثال، Tolson & Shoemaker (2004) از مدل SWAT برای ارزیابی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سد نیویورک استفاده کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که این مدل ابزار مناسبی برای تشخیص و ارزیابی اثرات دراز مدت شیوه‌های مختلف مدیریت فسفر جهت کاهش میزان آن در آب این سد است. همچنین، Abbaspour et al. (2007) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای تأثیرگذار بر روی میزان رواناب، رسوبات و عناصر غذایی از دست رفته در یک حوضه آبخیز در سوئیس استفاده کردند. این مطالعات نتایج بسیار خوبی را برای برآورد میزان رواناب و نیترا و نتایج نسبتاً خوبی را برای برآورد بار رسوبات و فسفر کل نشان داد.

به دلیل آنکه مدل‌های هیدرولوژیکی در معرض عدم قطعیت بالایی قرار دارند توصیف و کمی کردن عدم قطعیت این مدل‌ها در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بدین منظور پژوهشگران تکنیک‌های مختلفی را برای تجزیه و تحلیل عدم قطعیت این مدل‌ها ارائه کرده‌اند. این روش‌ها عبارتند از $GLUE^2$ ، $SUFI-2^3$ ، $MCMC^4$ و $ParaSol^5$ (Rostamian et al., 2008). از آنجاکه هر کدام از این روش‌ها برای شرایط خاصی کاربرد دارند، (Abbaspour et al. (2007) این روش‌ها را به صورت یک بسته نرم‌افزاری تحت عنوان SWAT CUP گردآوری کرده‌اند. (Rostamian et al. (2008) از مدل SWAT برای تخمین رواناب و رسوب در حوضه‌های

1. USDA-ARS, USDA-NRCS and Texas A&M University
 2. Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
 3. Sequential Uncertainty Fitting
 4. Markov Chain Monte Carlo
 5. Parameter Solution

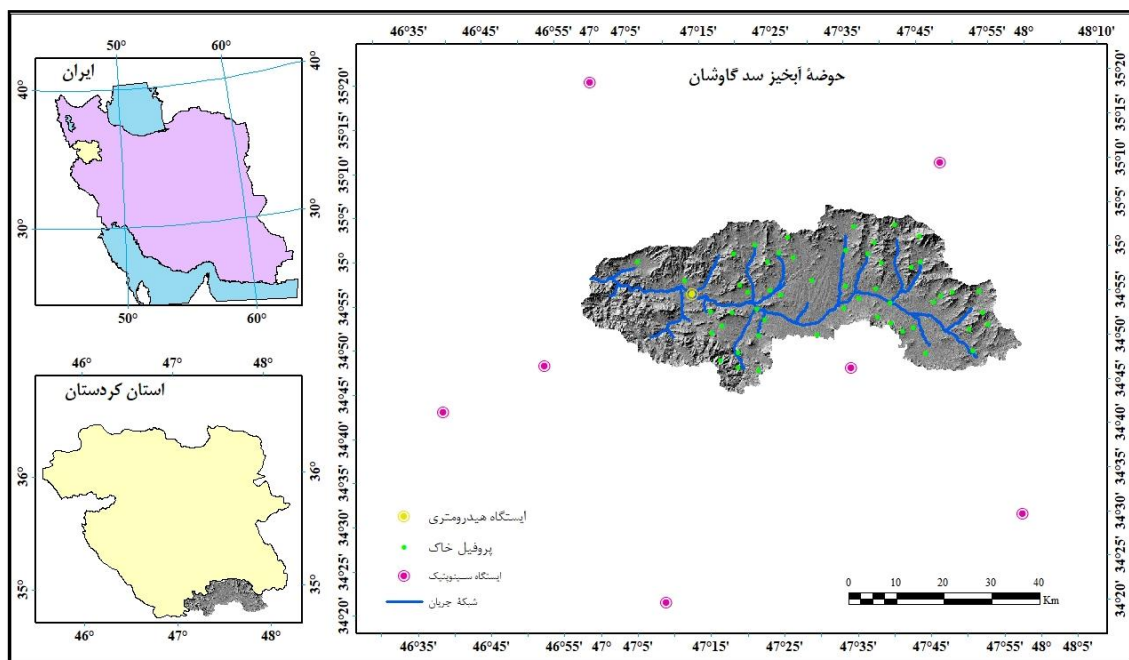
آبخیز بهشت‌آباد و ونک در کارون شمالی استفاده کردند. آن‌ها برای واسنجی و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت مدل از روش SUFI-2 در بسته نرم‌افزاری SWATCUP استفاده کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که دقت مدل برای واسنجی و اعتبارسنجی رواناب بهتر از رسوب بود. (Shirmohammadi *et al.* (2008) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT اثر روش‌های مدیریتی سازگار با محیط‌زیست را در چارچوب ورودی‌های متنوع بررسی کردند. در این مطالعه واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT هم به صورت استوکاستیک (تصادفی) و هم به صورت دترمینستیک (قطعی) انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد باید ماهیت استوکاستیک پارامترهای ورودی در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در نظر گرفته شوند.

سد گاوشان در استان کردستان در غرب ایران یکی از سدهای مهم در کشور است که جهت تأمین آب شرب شهر کرمانشاه و زمین‌های کشاورزی اطراف آن تأسیس شده است. حدود ۵۲ درصد از اراضی حوضه آبخیز این سد به کشاورزی اختصاص یافته است (محمودی و امین‌خواه، ۱۳۹۷). به دلیل کشت و کار در شیب‌های بالا و سیستم خاک‌ورزی سنتی این اراضی در معرض تخریب و فرسایش قرار دارند. بطور کلی هدف از این پژوهش کاربرد مدل SWAT، واسنجی و ارزیابی آن برای پیش‌بینی میزان رواناب و رسوب در حوضه آبخیز سد گاوشان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز سد گاوشان در غرب ایران با مساحتی در حدود ۲۰۶ هزار هکتار است، که در محدوده جغرافیایی ۴۶/۹۷ تا ۴۷/۹۸ درجه طول شرقی و ۳۴/۷۴ تا ۳۵/۰۹ درجه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). بخش‌هایی از این حوضه به همراه دریاچه سد در جنوب استان کردستان و بخش‌های بیشتری از آن در شمال استان کرمانشاه واقع شده است. اراضی این منطقه عمدتاً تپه‌ای با شیب متوسط ۲۰ درصد و شیب میانگین ۱۵ درصد است که ارتفاع آن‌ها بین ۳۲۳۰ متر در بلندترین نقطه تا ۱۴۵۶ متر در خروجی حوضه متغیر است. همچنین ارتفاع میانگین حوضه ۱۹۳۸ و ارتفاع میانگین آن ۱۹۲۱ متر است. مقدار بارندگی سالیانه حوضه بین ۳۲۹ میلی‌متر در شرق تا ۴۶۹ میلی‌متر در غرب متغیر و دارای میانگین ۳۸۹ میلی‌متر در کل حوضه است. در شکل (۲) نقشه پراکنش میانگین بارندگی سالیانه حوضه، که با استفاده از درون‌یابی مقدار بارندگی در ایستگاه‌های اطراف حوضه به روش کوکریجینگ (با متغیر کمکی ارتفاع) بدست آمده است، نشان داده شده است. رژیم حرارتی خاک‌های این منطقه مزیک و رژیم رطوبتی آن‌ها زیریک است.



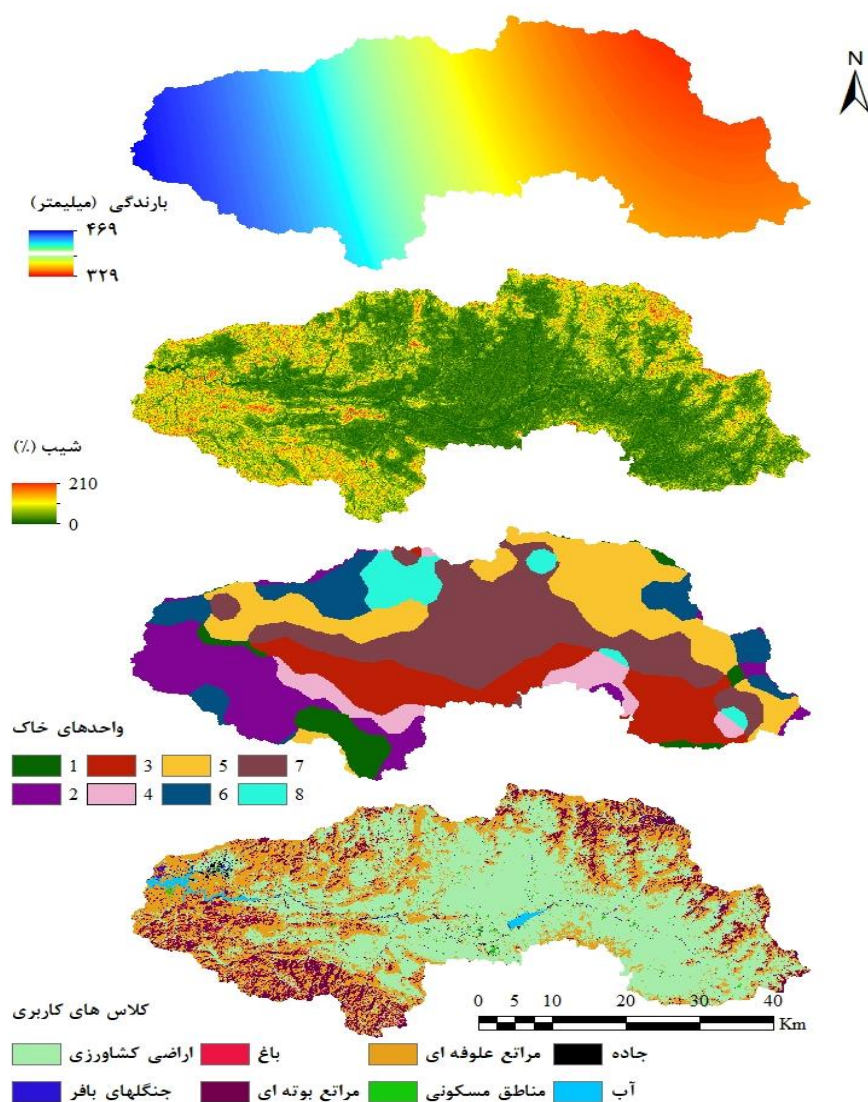
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه، پروفیل‌های خاک، شبکه آبراهه‌ها، ایستگاه‌های سینوپتیک و ایستگاه هیدرومتری و رسوب‌سنجی (ایستگاه خلیفه باپیر)

مدل SWAT

مدلی در مقیاس حوضه آبخیز است که قابلیت اتصال به نرم‌افزار ArcGIS را دارد. در این مدل هر حوضه به چند زیرحوضه و هر زیرحوضه به چند واحد پاسخ هیدرولوژیک^۱ (HRU)، که از نظر کاربری اراضی، شیب و خصوصیات خاک همگن هستند، تقسیم می‌شود. واحدهای پاسخ هیدرولوژیک یکسان در داخل یک زیرحوضه به صورت یک گروه در نظر گرفته شده و فرآیندهای هیدرولوژیکی و انتقال رسوب و مواد غذایی برای هر گروه شبیه‌سازی می‌شود. در این پژوهش، از میان گزینه‌های موجود در مدل SWAT برای برآورد رواناب از روش شماره منحنی رواناب، برای برآورد تبخیر و تعرق از روش پنمن-مانتیت و برای روندیابی جریان از روش ذخیره متغیر استفاده شد. همچنین در مدل SWAT مقدار بار رسوبات توسط معادله اصلاح شده جهانی هدر رفت خاک (MUSLE) برآورد می‌شود (Williams, 1975). انتقال رسوب در طول مسیر در کانال‌های جریان نیز بر مبنای مفهوم قدرت جریان است (Bagnold, 1977) که توسط Williams (1980) اصلاح شده است.

ورودی‌های مدل

داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل SWAT عبارتند از: نقشه رقمی ارتفاع (DEM)، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی و داده‌های اقلیمی. از نقشه‌های DEM برای مشخص کردن مرز حوضه آبخیز، تفکیک آن به زیرحوضه‌های مختلف و تهیه نقشه‌های شیب و شبکه جریان استفاده می‌شود. نقشه DEM استفاده شده در این مطالعه دارای درجه وضوح ۳۰ متر بود که از سایت سازمان نقشه‌برداری جغرافیایی ایالات متحده آمریکا (<https://earthexplorer.usgs.gov>) بدست آمد (شکل ۲).



شکل ۲. نقشه‌های شیب، خاک و کاربری اراضی حوضه

نقشه خاک

نقشه خاک‌های حوضه با استفاده از نتایج حاصل از پیمایش صحرایی و نیز کمک گرفتن از تصاویر ماهواره لندست ۸ و شاخص‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شد (Aminkhah, 2017). برای این کار مشاهدات حاصل از ۵۰ عدد پروفیل خاک و بالغ بر ۱۰۰ مورد مشاهده صحرایی (مقاطع طبیعی و ترانشه‌ها) مورد بررسی قرار گرفت. موقعیت جغرافیایی پروفیل‌های خاک در حوضه در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. سپس با در نظر گرفتن خصوصیات افق‌های سطحی و زیرسطحی نظیر رنگ، عمق، ساختمان، تجمع آهک و غیره پروفیل‌های مختلف تشریح گردیده و ضمن درج مشخصات آن‌ها در برگه‌های تشریح پروفیل نسبت به تهیه نمونه‌های خاک جهت انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی در آزمایشگاه اقدام گردید. در آزمایشگاه توزیع اندازه ذرات خاک به روش هیدرومتر (Gee & Bauder, 1986)، جرم مخصوص ظاهری خاک‌ها به روش استوانه (Blake & Hartge, 1986)، ضریب آبگذری اشباع خاک‌ها به روش بار ثابت (Klute & Dirksen, 1986) و ماده آلی خاک‌ها به روش والکلی و بلک (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شدند. پس از تهیه عصاره اشباع خاک‌ها در آزمایشگاه pH و EC آن‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده خاک‌های مختلف در سیستم جامع رده‌بندی خاک آمریکایی تا سطح فامیل رده‌بندی شدند. با در دست داشتن نتایج حاصل از رده‌بندی خاک‌ها و پیمایش صحرایی منطقه و نیز تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نسبت به تعیین مرز واحدهای خاک بر روی نقشه اقدام شد (شکل ۲). بر اساس این نقشه خاک‌های حوضه شامل ۸ واحد می‌باشند. در جدول (۱) سری خاک‌های غالب در هر واحد به همراه رده‌بندی مربوط به آنها در سیستم جامع رده‌بندی خاک آمریکایی تا سطح فامیل آورده شده‌اند.

جدول ۱. رده‌بندی آمریکایی و مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری خاک‌های حوضه

مساحت (%)	K (t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	رده‌بندی آمریکایی	سری خاک غالب	واحدهای خاک
۸/۲	۰/۲۶	Clay Skeletal, Mixed, Mesic, Typic Xerorthents	لنجاب	۱
۱۲/۴	۰/۳۴	Fine Silty, Mixed, Mesic, Typic Haploxerepts	حیدرآباد	۲
۱۳/۸	۰/۲۵	Loamy Skeletal, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	آگاه علیا	۳
۸/۹	۰/۲۶	Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	میوله	۴
۱۷/۴	۰/۱۸	Very Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	سرخوم	۵
۸/۲	۰/۱۹	Fine, Mixed, Mesic, Typic Haploxerolls	گردکانه علیا	۶
۲۲/۲	۰/۲۸	Clay Skeletal, Mixed, Mesic, Typic Calcixerepts	کله‌پا	۷
۸/۹	۰/۱۵	Fine, Mixed, Mesic, Typic Calcixerolls	حسین‌آباد دهبنه	۸

نقشه کاربری اراضی

در شکل (۲) نقشه کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه که با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ و تکنیک شبکه عصبی مصنوعی تهیه شده است، نشان داده شده است (محمودی و امین‌خواه، ۱۳۹۷) صحت کلی این نقشه ۷۸/۵ درصد و شاخص کاپای آن ۶۸/۵ درصد می‌باشد. بر اساس این نقشه کاربری کشاورزی ۵۱/۷ درصد، جنگل‌های بافر (درختان کنار رودخانه‌ای) ۰/۴ درصد، باغ ۱/۵ درصد، مراتع بوت‌ه‌ای ۱۲/۴ درصد، مراتع علوفه‌ای ۳۲ درصد، مناطق مسکونی ۰/۵ درصد، جاده ۰/۵ درصد و آب ۱ درصد از اراضی منطقه مورد مطالعه را در بر گرفته‌اند. گیاهان غالب در کاربری کشاورزی گندم و جو و در کاربری باغ سیب می‌باشند.

داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای اجرای مدل SWAT از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند. این داده‌ها شامل داده‌های روزانه بارندگی، حداقل و حداکثر دما، میزان تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد می‌باشند که برای یک دوره زمانی ۱۱ ساله، از اول ژانویه ۲۰۰۵ تا آخر دسامبر ۲۰۱۵، از ایستگاه‌های باوله، روانسر، سنقر، قروه، سنندج، کرمانشاه، کنگاور و کامیاران بدست آمدند. علاوه بر این داده‌ها مدل SWAT به تعدادی پارامتر اقلیمی نیز نیاز دارد (مانند میانگین و انحراف معیار حداقل و حداکثر دمای روزانه برای هر ماه و ...) که خود از این داده‌ها مشتق شدند. پس از وارد کردن داده‌ها و پارامترهای اقلیمی با فرمت مناسب در مدل SWAT این مدل قادر است تا با کمک شبیه‌ساز آب و هوایی خود (WXGEN) شرایط اقلیمی و یا داده‌های گم‌شده در بین داده‌های اندازه‌گیری شده اقلیمی را شبیه‌سازی کند.

بیکربندی حوضه و اجرای مدل

در این مطالعه حداقل مساحت لازم برای تشکیل زیرحوضه‌ها با در نظر گرفتن وضعیت مورفولوژیکی حوضه ۱۳۰ هکتار در نظر گرفته شد.

بر این اساس حوضه آبخیز مورد مطالعه دارای ۳۵ زیرحوضه گردید. همچنین از همپوشانی نقشه خاک (با ۸ کلاس)، نقشه کاربری اراضی (با ۸ کلاس) و نقشه شیب (با ۳ کلاس) حوضه در کل دارای ۲۶۶ واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) گردید. پس از وارد کردن داده‌ها و نقشه‌های مورد نیاز در مدل، شبیه‌سازی رواناب و رسوب برای یک دوره زمانی ۹ ساله، از اول ژانویه ۲۰۰۵ تا آخر دسامبر ۲۰۱۳، بر اساس گام زمانی ماهانه صورت گرفت. از بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ (سه سال اول) برای گرم کردن^۱ مدل استفاده شد تا مدل با شرایط محیطی به تعادل برسد. داده‌های خروجی از مدل در شش سال بعدی بسته به شرایط برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. بدین صورت زمانی که پارامترهای مدل به صورت مستقیم برآورد شدند، از این داده‌ها برای اعتبارسنجی و زمانی که پارامترهای مدل به صورت معکوس واسنجی شدند از داده‌های چهار سال اول (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱) برای واسنجی مدل و دو سال آخر (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

داده‌های هیدرولوژیکی

داده‌های هیدرولوژیکی شامل داده‌های رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده می‌باشند. از داده‌های هیدرولوژیکی برای آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد. این داده‌ها مربوط به یک بازه زمانی ۶ ساله، (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳)، می‌باشند که از ایستگاه خلیفه‌بایر بدست آمدند. بار کل رسوبات یک رودخانه از مجموع بار معلق و بار بستر تشکیل می‌شود. اندازه‌گیری بار بستر رودخانه به‌مراتب دشوارتر از اندازه‌گیری بار معلق است. به همین دلیل در اکثر موارد، از جمله در ایستگاه مورد مطالعه، تنها به اندازه‌گیری بار معلق اکتفا شده، سپس بار بستر بعنوان درصدی از بار معلق تخمین زده می‌شود. این مقدار بین ۱۰ تا ۵۰ درصد حجمی است (Refahi, 2015) که در این مطالعه بر اساس شیب زیاد حوضه، شواهد میدانی و نتایج حاصل از مدل SWAT مقدار ۵۰ درصد در نظر گرفته شد.

از طرف دیگر اندازه‌گیری بار معلق رودخانه برای تمامی زمان‌ها و رخدادها مشکل است، لذا در اکثر موارد، از جمله در ایستگاه مورد مطالعه، تنها به اندازه‌گیری بار معلق در برخی از زمان‌ها و رخدادها اکتفا می‌شود. سپس بار معلق بعنوان تابعی از دبی رودخانه تخمین زده می‌شود. رابطه بین دبی رودخانه و بار معلق با استفاده از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی، در مواردی که این دو پارامتر بطور همزمان اندازه‌گیری شده بودند، بدست آمد. شبکه عصبی مورد استفاده برای این منظور از نوع پیش‌خور^۲ و دارای دو لایه بود. نرون‌های لایه مخفی آن از نوع سیگموئیدی و نرون‌های لایه خروجی آن از نوع خطی بود. برای آموزش شبکه از الگوریتم پس‌انتشار^۳ لونیبرگ-مارکوات استفاده شد. تعداد نرون‌های لایه مخفی ۳ عدد در نظر گرفته شد. این شبکه دارای یک متغیر ورودی (دبی رواناب) و یک متغیر خروجی (دبی رسوب) بود. داده‌های مورد استفاده برای ایجاد شبکه عصبی به طور تصادفی به سه گروه آموزشی (۷۵ درصد)، اعتبارسنجی (۱۵ درصد) و آزمون (۱۵ درصد) تقسیم شدند.

آنالیز حساسیت مدل

برای انجام آنالیز حساسیت از نرم‌افزار SWAT CUP (Abbaspour et al., 2007; Abbaspour, 2015) استفاده شد. بدین صورت که از میان پارامترهای مختلف مدل تعداد ۲۷ پارامتر، که در منابع مختلف نیز از آن‌ها بعنوان پارامترهای مهم و حساس نامبرده شده است، جهت انجام آنالیز حساسیت انتخاب شدند. آنالیز حساسیت به روش استوکاستیک انجام گرفت. در این روش ابتدا با استفاده از روش نمونه‌گیری مکعب لاتین^۴ مقادیری تصادفی از پارامترها تولید می‌شود. سپس مدل با این مقادیر از پارامترها اجرا می‌گردد. در گام بعدی با استفاده از رگرسیون چند متغیره تغییرات مقدار یک تابع هدف در برابر تغییرات پارامترهای تولیدشده همبسته می‌شود. سپس با استفاده از آزمون t (آزمون ضرائب رگرسیون) میزان حساسیت مدل نسبت به آن پارامتر در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ سنجیده می‌شود؛ بدین صورت که اگر سطح معنی‌داری (P) یک پارامتر کمتر از ۰/۰۵ باشد، اثرات آن بر روی تغییرات تابع هدف معنی‌دار و لذا مدل نسبت به آن حساس می‌باشد (Abbaspour, 2015). از جمله معروف‌ترین شاخص‌هایی که در نرم‌افزار SWAT CUP و از جمله در آنالیز حساسیت بعنوان تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند ضریب نیکویی برازش یا ضریب تبیین (R^2) و شاخص نش - ساتکلیف (NS) می‌باشند (Abbaspour, 2015) که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

1 . warm up
2. feed forward
3. backpropagation
4 . Latin hypercube sampling

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(q_{s,i} - \bar{q}_{s,i})(q_{m,i} - \bar{q}_{m,i})]^2}{\sum_{i=1}^N (q_{s,i} - \bar{q}_{s,i})^2 \sum_{i=1}^N (q_{m,i} - \bar{q}_{m,i})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [q_{m,i} - q_{s,i}]^2}{\sum_{i=1}^N [q_{m,i} - \bar{q}_m]^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این فرمول‌ها، N تعداد کل نمونه‌ها، Q_m مقادیر اندازه‌گیری شده، Q_s مقادیر پیش‌بینی شده، \bar{Q}_m میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و \bar{Q}_s میانگین مقادیر برآورد شده متغیر مورد نظر می‌باشد. مقدار شاخص NS از $-\infty$ تا 1 متغیر است. مقدار 1 بیانگر برآزش کامل مقادیر برآورد شده بر مقادیر اندازه‌گیری شده است. برای مقادیر NS کمتر از صفر کارایی مدل ضعیف، بین صفر تا 0.5 متوسط و بزرگتر از 0.5 رضایت‌بخش خواهد بود (Quinton, 1997; Moore et al., 2007). لازم به ذکر است در این پژوهش از شاخص نش-ساتکیف بعنوان تابع هدف استفاده شد که خود بر اساس دبی ماهانه رواناب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده محاسبه شد. داده‌های دبی ماهانه رواناب اندازه‌گیری شده مربوط به یک بازه زمانی ۶ ساله، (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳)، می‌باشند که از ایستگاه خلیفه‌بایر بدست آمدند.

واسنجی مدل

پس از انجام آنالیز حساسیت و تشخیص پارامترهای حساس واسنجی مدل با استفاده از آن‌ها انجام گرفت. واسنجی مدل به کمک نرم‌افزار SWAT CUP و الگوریتم SUFI-2 صورت گرفت (Abbaspour, 2015). در این روش آنالیز حساسیت به صورت استوکاستیک انجام می‌گیرد. بدین صورت که ابتدا برای هر پارامتر ورودی دامنه‌ای از عدم قطعیت، که از نظر فیزیکی نیز معنی‌دار باشد، در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش نمونه‌گیری مکعب لاتین مقادیری تصادفی از پارامترهای ورودی در دامنه‌های عدم قطعیت آنها تولید می‌شود. اجرای چندین باره مدل با استفاده از این پارامترها باعث می‌شود که متغیر خروجی نیز از دامنه‌ای از عدم قطعیت برخوردار باشد. عبارت دیگر در این روش مدل به جای یک جواب واحد (یک سیگنال) دارای دامنه‌ای از جواب‌هاست. درصدی از متغیر اندازه‌گیری شده که در فاصله عدم قطعیت ۹۵ درصد متغیر شبیه‌سازی شده (بین $2/5$ درصد تا $97/5$ درصد در توزیع تجمعی متغیر شبیه‌سازی شده) قرار داشته باشد، P فاکتور نامیده می‌شود. این فاکتور نشان می‌دهد که چه مقدار از عدم قطعیت توسط مدل به دام انداخته می‌شود. همچنین نسبت ضخامت متوسط باند عدم قطعیت ۹۵ درصد به انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای R فاکتور نامیده می‌شود؛ که نیکویی واسنجی را نشان می‌دهد. در روش SUFI-2 ابتدا واسنجی با دامنه گسترده‌ای از پارامترهای ورودی شروع می‌شود به نحوی که همه داده‌های اندازه‌گیری شده در باند ۹۵ درصد عدم قطعیت متغیر خروجی قرار گیرند، سپس در هر تکرار این دامنه کوچکتر می‌شود تا مقدار R فاکتور نیز کوچکتر گردد. بهترین راه حل زمانی بدست می‌آید که P فاکتور حتی‌الامکان به 100 و R فاکتور حتی‌الامکان به صفر نزدیکتر گردد. اما اینکه مقادیر این پارامترها چقدر باید باشد تا نتایج مدل قابل قبول گردد دقیقاً مشخص نیست. بدین منظور (Abbaspour et al., 2015) برای رواناب مقدار P فاکتور را 70 درصد و R فاکتور را در حدود 0.5 پیشنهاد می‌کند، درحالی‌که برای رسوب حتی مقادیر کمتری را برای P فاکتور و بیشتری را برای R فاکتور نیز قابل قبول می‌داند. برخی دیگر از محققین مقدار R فاکتور کوچکتر از 1 را بیانگر واسنجی خوب مدل می‌دانند (Rostamian et al., 2008).

در این پژوهش برای واسنجی مدل SWAT از روشی مشابه روش (Rostamian et al., 2008) استفاده شد. بدین صورت که واسنجی مدل در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول مدل تنها بر اساس دبی ماهانه رواناب واسنجی شد. تابع هدف در این مرحله ضریب نش-ساتکیف (معادله ۲) بود. در مرحله دوم مدل مجدداً بر اساس دبی ماهانه رسوب و رواناب با هم واسنجی گردید. در این مرحله تابع هدف به صورت زیر بود:

$$G = w_1 NS_Q + w_2 NS_S \quad \text{رابطه (۳)}$$

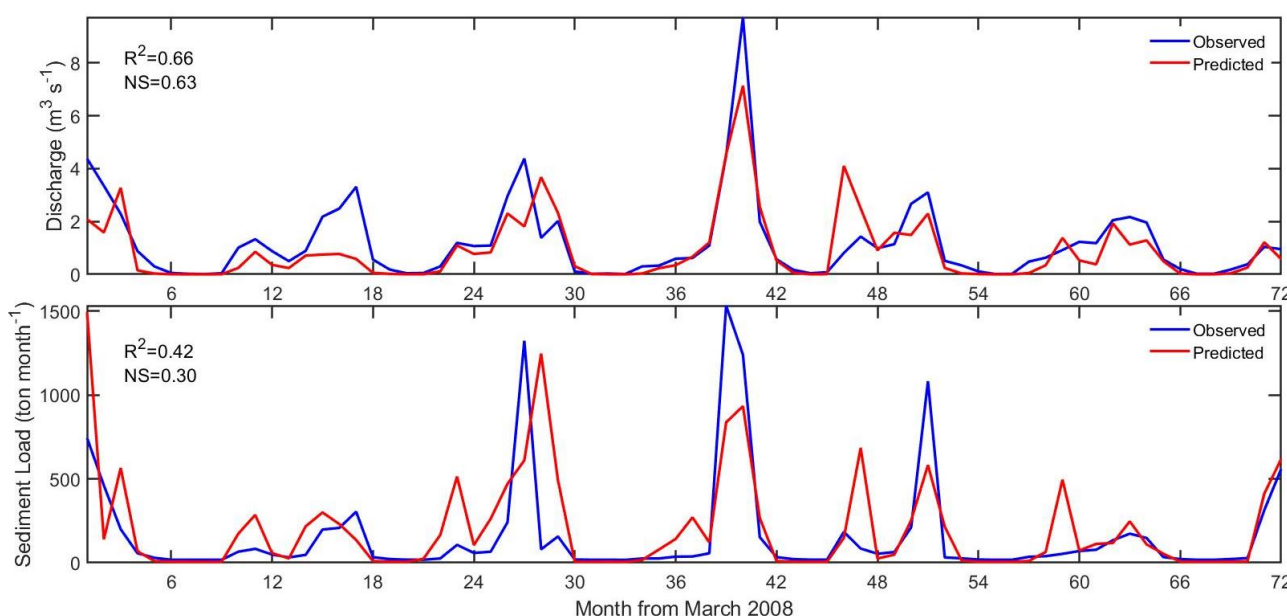
که در آن NS_Q شاخص نش-ساتکیف بر اساس دبی رواناب، NS_S شاخص نش-ساتکیف بر اساس دبی رسوب و w_1 و w_2 وزن این شاخص‌هاست که از رابطه $1/n\delta^2$ محاسبه می‌شود که در آن n تعداد داده‌ها و δ^2 واریانس آنهاست. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، داده‌های رواناب و رسوب در یک بازه زمانی ۶ ساله (۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳) از ایستگاه خلیفه‌بایر بدست آمدند که از داده‌های ۴ سال اول آن برای واسنجی مدل و ۲ سال آخر آن برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

نتایج و بحث

در شکل (۳) نتایج حاصل از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در ایستگاه خلیفه‌بایر نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی‌ها پارامترهای مدل SWAT بطور مستقل (مستقیم) بدست آمده‌اند. بطوریکه که ملاحظه می‌شود مدل SWAT برآورد قابل قبولی از رواناب بدست داده است ($NS > 0.5$)، اما دقت آن برای پیش‌بینی مقدار بار رسوب نسبت به رواناب کمتر و در حد متوسطی قرار دارد ($NS < 0.5$). همچنین در زمان‌های اوج مقدار رواناب کمتر از مقدار واقعی آن برآورد می‌شود و با گذشت زمان کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب و رسوب افزایش می‌یابد.

وجود چشمه‌های پرآب در منطقه مطالعاتی و نبود اطلاعات در مورد آنها و نیز عدم اطلاعات مربوط به مصرف آب از رودخانه اصلی منطقه را می‌توان بعنوان دلایلی بر ضعف مدل در شبیه‌سازی جریان‌های اوج دانست. بعلاوه از دیگر دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب می‌توان به خوب شبیه‌سازی نکردن ذوب برف و فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع اشاره کرد. در مطالعه مشابهی (Shirmohammadi *et al.* (2008) نیز با بکارگیری مدل SWAT در یک حوضه آبخیز در مریند نشان دادند که این مدل قادر نیست شرایط هیدرولوژیکی را برای دوران ترسالی شبیه‌سازی کند و ذوب سریع برف نیز در نمودار جریان شبیه‌سازی شده ناهماهنگی ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، مدل‌های شبیه‌سازی حوضه آبریز عملکرد ضعیفی در برآورد مقادیر کم جریان از خود نشان می‌دهند. این مشکل را می‌توان به ساده‌سازی‌های این‌گونه مدل‌ها در شبیه‌سازی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در وقایع بارندگی با ارتفاع کم دانست (Hantush & Kalin, 2005). همچنین (Rostamian (2006) در مطالعه حوضه آبخیز بهشت‌آباد از زیر حوضه‌های کارون شمالی نیز نشان داد که از علل ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب در برخی از ماه‌ها، خوب شبیه‌سازی نکردن ذوب برف، فرضیات مدل در انتقال جریان در لایه‌های یخ‌زده و اشباع و آمار هواشناسی کوتاه‌مدت می‌باشد.

کارایی کمتر مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب نسبت به رواناب علاوه بر عدم قطعیت مدل ممکن است ناشی از عدم قطعیت بیشتر داده‌های اندازه‌گیری شده رسوب نسبت به رواناب نیز باشد. زیرا همان‌طور که پیشتر گفته شد، در ایستگاه مورد مطالعه بار معلق بعنوان تابعی از دبی رودخانه تخمین زده شد. همچنین بار بستر نیز بعنوان ۵۰ درصد بار معلق تخمین زده شد. از این‌رو می‌توان گفت که داده‌های بار رسوب دقت داده‌های رواناب را ندارند و لذا در مقایسه نتایج بدست آمده از مدل با این داده‌ها باید به این موضوع توجه شود.



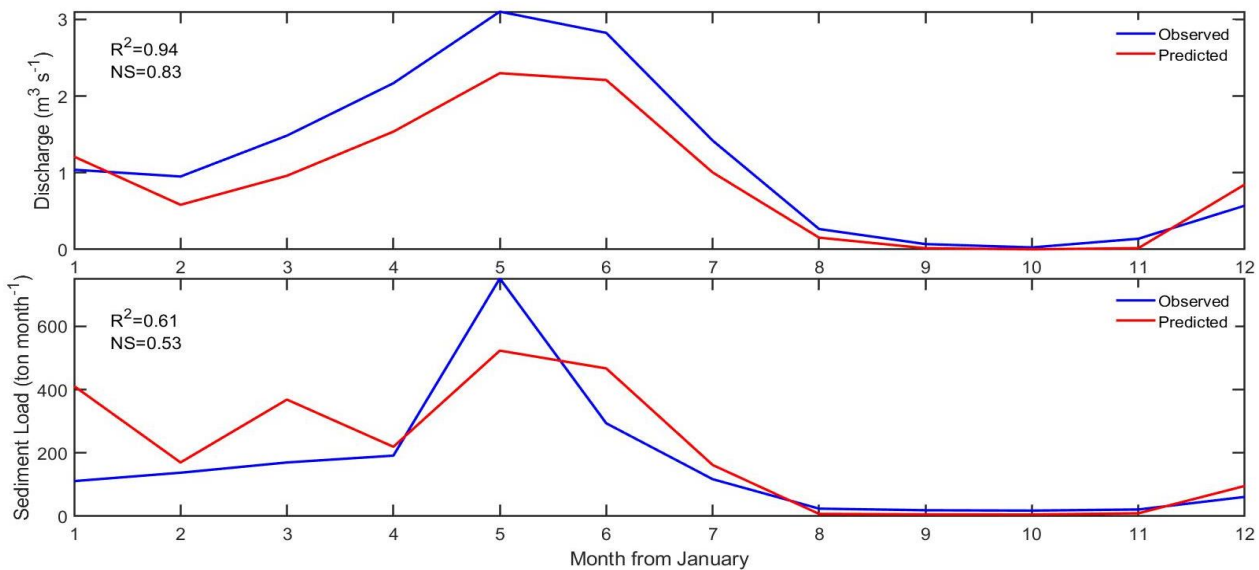
شکل ۳. مقادیر ماهانه رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل SWAT در ایستگاه خلیفه‌بایر

افزایش دقت مدل SWAT با گذشت زمان در شبیه‌سازی رواناب و رسوب اصطلاحاً به گرم شدن مدل معروف است و ناشی از آن است که با گذشت زمان شرایط اولیه که برای شبیه‌سازی در زمان‌های بعدی مورد نیاز است به مقادیر واقعی خود نزدیکتر می‌گردد و همین امر دقت مدل را افزایش می‌دهد. از این‌رو پیشنهاد می‌گردد که چنانچه داده‌های کافی در دسترس باشد یک دوره زمانی برای گرم شدن

مدل در نظر گرفته شود.

بطور کلی علاوه بر نقطه‌ضعف‌هایی که هر مدل در شبیه‌سازی دنیای واقعی دارد، در این پژوهش علل دیگری هم سبب اختلاف شبیه‌سازی‌های مدل با مقادیر مشاهده‌ای شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به واقع شدن ایستگاه‌های هواشناسی در خارج از حوضه برای اندازه‌گیری باران، برف، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی اشاره کرد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و تغییرات نسبتاً زیاد اقلیمی بویژه از شرق به غرب حوضه این مسأله بر عدم قطعیت پارامترهای ورودی اقلیمی مدل می‌افزاید. علاوه بر این کوتاه بودن دوره آماری اکثر ایستگاه‌ها و کمبود تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری مزید بر علت می‌باشند.

در شکل (۴) نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های مدل SWAT در مقیاس میانگین ماهانه نشان داده شده‌اند. در این نمودار مقادیر رواناب و رسوب در هر ماه از میانگین مقادیر رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده یا شبیه‌سازی شده در آن ماه در طول دوره اندازه‌گیری و یا شبیه‌سازی (۶ سال) بدست آمده‌اند. بطوریکه ملاحظه می‌شود دقت مدل SWAT در این مقیاس نسبت به مقیاس ماهانه هم برای شبیه‌سازی رواناب و هم برای شبیه‌سازی رسوب افزایش یافته است. بطوریکه شاخص نش-ساتکلیف برای رواناب از ۰/۶۳ به ۰/۸۳ و برای رسوب از مقدار متوسط ۰/۳ به مقدار قابل قبول ۰/۵۳ افزایش یافته است. این موضوع ماهیت احتمالی (استوکاستیک) بودن نتایج مدل SWAT را به روشنی نمایان می‌سازد. بدین معنا که نتایج حاصل از مدل SWAT در تکرارهای زیاد به مقادیر واقعی نزدیکتر است. به بیان دیگر دقت مدل SWAT برای تک رخدادها کمتر است. این نتایج توسط محققین دیگری نیز گزارش شده‌اند. بعنوان مثال Tolson & Shoemaker (2004) و Peterson & Hamlet (1998) گزارش کرده‌اند که مدل SWAT برای شبیه‌سازی تک رخدادها طراحی نشده است و معمولاً حداکثر وقایع را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند.



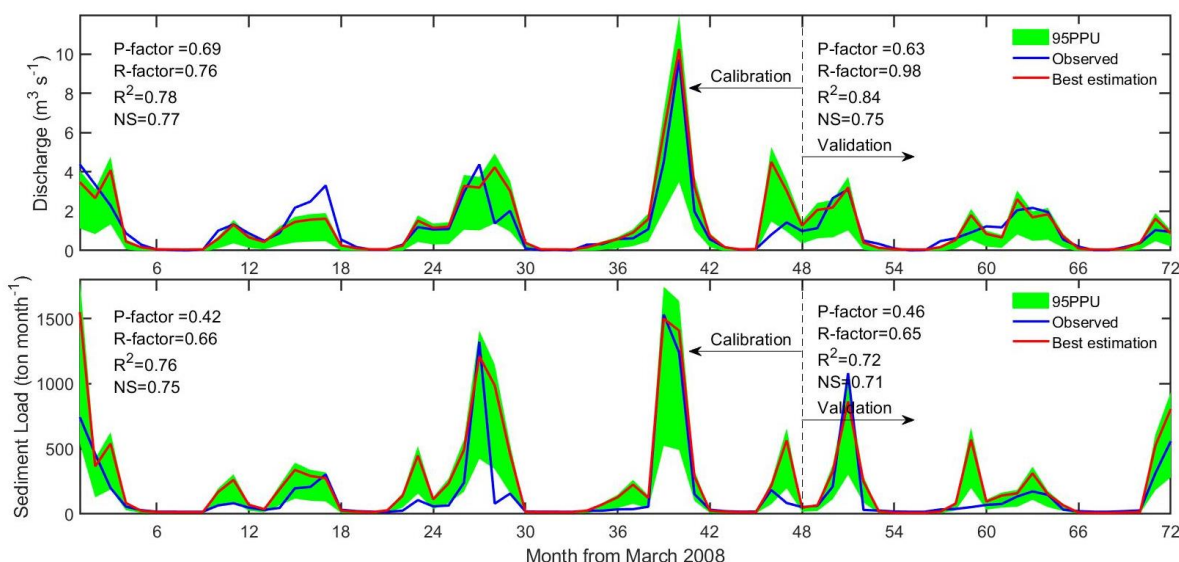
شکل ۴. مقادیر رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل SWAT در مقیاس زمانی میانگین ماهانه در ایستگاه خلیفه‌بایر

هر چند که شرط اصلی اعتبار یک مدل آن است که پارامترهای آن بطور مستقیم برآورد شوند، باین حال چنانچه در حوضه داده‌های هیدرومتری در دسترس باشند، می‌توان مدل SWAT را به کمک آنها واسنجی کرده و دقت مدل را باز هم افزایش داد. در این پژوهش واسنجی مدل بر اساس پارامترهایی که مدل بیشترین حساسیت را نسبت به آنها داشت انجام گرفت. از میان ۲۷ پارامتر انتخاب شده برای آنالیز حساسیت مدل نسبت به ۸ پارامتر حساس بود. در جدول (۱) دامنه تغییرات اولیه انتخاب شده برای هر پارامتر به همراه دامنه تغییرات آنها بعد از واسنجی آورده شده است. در شکل (۵) نتایج حاصل از واسنجی (۴ سال اول) و نیز اعتبارسنجی (۲ سال آخر) مدل SWAT برای رواناب و رسوب بر اساس داده‌های بدست آمده از ایستگاه خلیفه‌بایر نشان داده شده است. بطوریکه ملاحظه می‌شود مقادیر R فاکتور برای رواناب و رسوب در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل کمتر از ۱ می‌باشد. این موضوع به همراه P فاکتور بیشتر از ۶۰ درصد برای رواناب و بیشتر از ۴۰ درصد برای رسوب بیانگر واسنجی و اعتبارسنجی خوب مدل برای رواناب و نسبتاً خوب آن برای رسوب می‌باشد. از طرف دیگر در این حالت مدل در بهترین تخمین خود دارای مقادیر مطلوب R^2 و NS بیش از ۷۰ درصد در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی است.

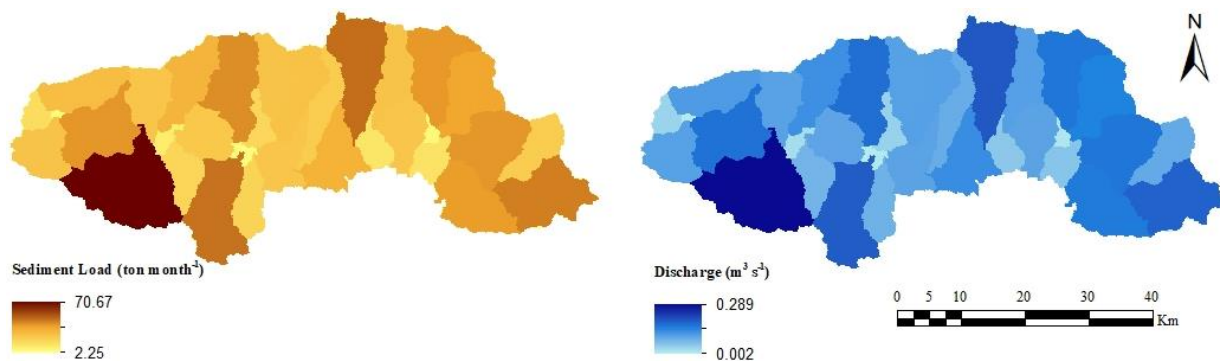
جدول ۲. پارامترهای ورودی انتخاب شده مدل SWAT برای واسنجی

پارامتر*	توضیحات	دامنه اولیه		دامنه نهایی	
		بیشترین	کمترین	بیشترین	کمترین
r_CN2.mgt	شماره منحنی در شرایط رطوبتی II	۰/۴	-۰/۴	۰/۲۱	-۰/۱۸
r_SOL_DB.sol	جرم مخصوص ظاهری خاک	۰/۴	-۰/۴	۰/۰۵	-۰/۰۶
r_SOL_AWC.sol	ظرفیت آب قابل استفاده	۰/۵	-۰/۵	۰/۳۸	۰/۱۰
r_SOL_K .sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	۰/۱۸	-۰/۱۸	۰/۶۷	۰/۴۰
v_SLSUBBSN.hru	متوسط طول شیب	۱۵۰	۱۰	۴۷/۵۲	۲۶/۲۹
v_SFTMP.bsn	دمای ذوب برف	۵	-۵	۴	۲/۱۶
v_SMTMP.bsn	دمای پایه ذوب برف	۵	-۵	۵	۲/۳۳
v_USLE_K.sol	فاکتور فرسایش پذیری خاک در معادله USLE	۰/۴	-۰/۴	۰/۲۱	۰/۰۶

* r بدین معناست که مقدار اولیه پارامتر در هنگام واسنجی با یک مقدار جدید جایگزین می‌شود و r بدین معناست که مقدار پارامتر در (یک نسبت مشخص +) ضرب می‌شود.



شکل ۵. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای رواناب و رسوب



شکل ۶. میانگین سالیانه دبی رواناب و رسوب در زیرحوضه‌های مختلف حوضه

شکل (۶) میانگین سالیانه دبی رواناب و رسوب را در زیرحوضه‌های مختلف حوضه نشان می‌دهد. دبی متوسط سالیانه رواناب زیرحوضه‌ها بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۲۸۹ مترمکعب بر ثانیه و دبی متوسط سالیانه رسوبات بین ۲/۲۵ تا ۷۰/۶۷ تن بر ماه متغیر است. زیرحوضه واقع در جنوب غربی حوضه دارای بیشترین میزان رسوب و رواناب تولیدی است. این مسأله ممکن است ناشی از شیب زیاد حوضه در این زیرحوضه باشد؛ در واقع شیب متوسط حوضه در این مناطق نیز بیشتر از سایر مناطق حوضه است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان رواناب و رسوب در حوضه آبخیز سد گاوشان با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی شد. نتایج بدست آمده نشان داد که حتی در صورتی که پارامترهای مدل بصورت مستقل برآورد شوند مدل از کارایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب و کارایی نسبتاً خوبی برای شبیه‌سازی رسوب برخوردار است؛ با این حال، واسنجی مدل کارایی آن را در هر دو مورد افزایش داد. بعلاوه کارایی مدل در شبیه‌سازی رواناب بیشتر از رسوب و کارایی آن در مقیاس میانگین ماهانه بیشتر از مقیاس ماهانه بود. از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب می‌توان به خوب شبیه‌سازی نکردن ذوب برف و یا فقدان اطلاعات در مورد برداشت آب از سفره‌های آب زبرزمینی و یا تغذیه آن‌ها اشاره کرد. همچنین کارایی کمتر مدل در شبیه‌سازی رسوب نسبت به رواناب را علاوه بر عدم قطعیت مدل می‌توان به عدم قطعیت بیشتر داده‌های اندازه‌گیری شده رسوب نسبت به رواناب نسبت داد. بطور کلی نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل SWAT از قابلیت خوبی برای تصمیم‌گیری در مدیریت رواناب و رسوب در حوضه مورد مطالعه برخوردار است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

محمودی، محمد علی، امین خواه؛ سحر، (۱۳۹۷) تهیه نقشه کاربری و پوشش اراضی با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شبکه عصبی مصنوعی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۹، شماره ۵، ص ۱۱۷۱ - ۱۱۸۰.

REFERENCES

- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. EAWAG. Swiss.
- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Kløve, B. (2015). 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.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., Srinivasan, R. and Reichert, P. (2007). Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. 333, 413–430.
- Ahl, R. S., Woods, S. W. and Zuuring, H. R. (2008). Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, USA. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(6), 1411–1430.
- Ahmadi Ilkhchi, A., Hajabbassi, M. A. and Jalalian, A. (2003) Effects of converting range to dry-farming land on runoff and soil loss and quality in Dorahan, Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 6(4), 103–114.
- Aminkhah, S. (2017). Simulation of runoff and sediment yield using SWAT in Gawshan dam watershed. MSc. thesis, University of Kurdistan, Sanandaj.
- Arabi, M., Govindaraju, R. S., Engel, B. and Hantush, M. (2007). Multiobjective sensitivity analysis of sediment and nitrogen processes with a watershed model. *Water Resources Research*, 43(6), 1–11.
- Bagnold, R. A. (1977). Bed load transport in natural rivers. *Water Resources Research*, 13, 303–312.
- Behera, S. and Panda, R. K. (2006). Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 113(1–4), 62–72.
- Blake, G. R. and Hartge K. H. (1986). Particle density. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. (pp. 377-381). ASA and SSSA, Madison, WI.
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerda, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., . . . Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 780, 146494-146512.
- Dregne, H. E. (1992). Erosion and soil productivity in Asia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, 8–13.
- FAO, UNDP and UNEP (1994) Land degradation in south Asia: its severity, causes and effects upon the people. World Soil Resources Report no. 78, FAO, Rome.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., Eckhardt, K. and Frede, H. G. (2001). Hydrologic response to land use changes on

- the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 26(7-8), 577-582.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. (pp. 383-409). ASA and SSSA, Madison, WI.
- Hantush, M. M. and Kalin, L. (2005). Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with kineros2. *Hydrological Sciences Journal*. 50(6), 1151-1171.
- Klute, A. and Dirksen C. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. (pp. 687-734). ASA and SSSA, Madison, WI.
- Mohammadi, Sh., Karimzadeh, H., and Alizadeh, M. (2018). Spatial estimation of soil erosion in Iran using RUSLE model. *Echohydrology*, 5(2), 551-569.
- Mahmoodi, M. A. and Aminkhah, S. (2018). Providing land use and land cover maps using remote sensing data and artificial neural network. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(5), 1171-1180. (In Persian)
- Moore, A. D., McLaughlin, R. A., Mitasova, H. and Line, D. E. (2007). Calibrating WEPP model parameters for erosion prediction on construction sites. *Transactions of the ASABE*, 50(2), 507-516.
- Morgan, R. P. C. and Nearing, M. A. (2011). *Handbook of erosion modelling* (2th ed.). Chichester: Wiley-Blackwell.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. and King, K.W. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. Texas A&M University System, Texas.
- Panagos, P., & Katsoyiannis, A. (2019). Soil erosion modelling: The new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environmental Research*, 172, 470-474.
- Peterson, J. R. and Hamlet, J. M. (1998). Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 531-544.
- Quinton, J. N. (1997). Reducing predictive uncertainty in model simulations: A comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). *Catena*, 30(2), 101-117.
- Refahi, H. Gh. (2015). *Water Erosion and Conservation*. Tehran: University of Tehran Press.
- Rhoades, J. D. and Oster J. D. (1986). Solute Content. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. (pp. 985-1006). ASA and SSSA, Madison, WI.
- Rostamian, R. (2006). Assessment of runoff and sediment in Beheshtabad watershed, Northern Karun by SWAT 2000. M.Sc. Thesis, Isfahan University of Technology, Iran.
- Rostamian, R. Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A. and Abbaspour, K. C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53(5), 977-988.
- Shirmohammadi, A., Chu, T. W. and Montas, H. J. (2008). Modeling at catchment scale and associated uncertainties. *Boreal Environment Research*, 13(3), 185-193.
- Tolson, B. A. and Shoemaker, C. A. (2004). Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville Reservoir. Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- Walkley, A. and Black I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37:29-38.
- Williams, J. R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. p. 244-252. *Proceedings of the Sediment-Yield Workshop*, 40, 244-252.
- Williams, J. R. (1980). SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. *Water Resources Bulletin*, 16, 843-848.



Simulation of runoff and sediment yield using SWAT in Gawshan dam watershed

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil erosion by water is a global threat to the environment that negatively affects soil and water quality. Soil erosion modeling is a promising method to simulate soil erosion to identify sediment source areas and to evaluate soil conservation measures. The objective of this study was to use the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model runoff and sediment in Gawshan dam watershed in west of Iran.

Materials and Methods

The input data required to implement the SWAT include digital elevation map (DEM), soil map, land use/land cover map and climate data. DEM was used to delineate the watershed boundary, divide it into different sub-basins, and prepare slope and flow network maps. It had a resolution of 30 meters which obtained from the United States Geographic Survey. Soil map was prepared from land survey and Landsat ETM remote sensing data. The soil physical and chemical parameters required to run SWAT were measured in the different soil units, and its spatial distribution was coincident with the soil unit boundaries. The climatic data obtained from a period of 11 years, from January 1, 2005 to the end of December 2015, from the stations of Bavale, Ravansar, Songhor, Qurveh, Sanandaj, Kermanshah, Kangavar and Kamyaran were used. The two different approaches for estimating the model parameters have been used. In the forward deterministic approach model, parameters were independently derived from digital elevation model (DEM), soil and land use maps and climate data, whereas in the inverse stochastic approach model, calibration were performed by sensitive model parameters using Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2), which is one of the programs interfaced with SWAT, in the package SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Programs). Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe efficiency (NS) in the forward approach and P and R factor in the inverse approach.

Results and Discussion

Results showed that in the first approach, based on monthly data (2008-2013), the model performance was satisfactory for runoff ($R^2=0.66$; $NS=0.63$) and fair for sediment ($R^2=0.42$; $NS=0.3$). However, model prediction improved for both runoff ($R^2=0.94$; $NS=0.83$) and sediment ($R^2=0.61$; $NS=0.53$) when they were averaged on the monthly basis. Calibration of the model parameters improved its performance for runoff (P factor >0.6 ; R factor <1) and sediment (P factor >0.4 ; R factor <1). One of the reasons of the model weakness in simulating runoff is its uncertainty in simulating snow melting or the lack of information about water withdrawal from aquifers in the study area. Also, the lower efficiency of the model in simulating the sediment compared to the runoff can be attributed to the greater uncertainty of the measured data of the sediment compared to the runoff. Overall, these results demonstrated that the SWAT has the potential as a decision-making tool in the Gawshan dam watershed management.

Keywords: SWAT, Runoff, Sediment, Gawshan.