دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

# شبیه‌سازی دبی و نیترات آب در حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل SWAT

**مازیار محمّدی[۱]، عطااله کاویان[۲] و لیلا غلامی[۳]**

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول: a.kavian@sanru.ac.ir)
۳- استادیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۱

**چکیده**

**به‌منظور کنترل و کاهش آلودگی در آب‌های سطحی در مقیاس حوزه‌های آبخیز به برنامه‌ها و اقدامات زیست-محیطی در جهت کاهش این آلاینده‌ها نیاز می‌باشد و هم‌چنین برای اطمینان از مقرون به صرفه بودن این اقدامات در مرحله اول نیاز است تا مناطق بحرانی تولید کننده رواناب‌های آلوده شناسایی شوند. مدل‌های هیدرولوژیکی فرآیند مبنا ابزاری مناسب در شبیه‌سازی فرآیندهای حوزه آبخیز می‌باشند. در این مطالعه برای شبیه‌سازی دبی و نیترات در حوزه رودخانه تالار از مدل نیمه‌فیزیکی SWAT استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP آنالیز حساسیت واسنجی و صحت سنجی شد و سپس توسط شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای آنالیز حساسیت دبی و نیترات از ۲۵ و ۱۱ پارامتر استفاده شد که شماره‌ی منحنی به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر شناخته شد. ضریب تبیین، واسنجی دبی و نیترات به‌ترتیب با مقادیر ۰/٦۸ و ۰/۷۵ و صحت‌سنجی آن‌ها نیز به‌ترتیب با مقادیر ۰/٦۵ و ۰/۸۳ محاسبه شد. ضریب نش ساتکلیف برای واسنجی دبی و نیترات به‌ترتیب ۰/٦۷ و ۰/۸٤ و در مرحله صحت‌سنجی ۰/٦۲ و ۰/٦۳ به‌دست آمد. در نهایت نیز نقشه دبی و نیترات خروجی از هر زیرحوزه تهیه شد. نتایج حاصل ازاین مطالعه نشان داد که مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب رودخانه تالار می‌باشد، از این‌رو می‌توان از این مدل به‌عنوان ابزاری مناسب در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در این حوزه آبخیز استفاده کرد.**

**واژه‌های کلیدی: مدل هیدرولوژیکی، واسنجی، صحت‌سنجی، مدیریت منابع آب، حوزه آبخیز تالار**

## مقدمه

آب یک منبع طبیعی اساسی در توسعه اقتصادی- اجتماعی جامعه بشری و هم‌چنین حیات اکوسیستم می باشد که تصفیه آن دشوار، انتقال آن پرهزینه و جایگزین کردن آن غیرممکن است (۵۸،۳۹،۴۳،۵۰). با توجه به تغییرات اقلیمی و اقتصادی- اجتماعی، منابع آبی در سراسر جهان در مرحله‌ی بحرانی بوده و مشکل کمبود و آلودگی آن برای جهانیان مسائل عدیده‌ای را به‌وجود آورده است. مدیریت کمی و کیفی آب اغلب بر مدل‌های توزیعی حوزه آبخیز متکی است که می‌توانند منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و هم‌چنین سرنوشت آلاینده‌ها را تحت شرایط فعلی و یا سناریوهای مدیریتی مدل‌سازی کنند (۶۰). این مدل‌ها ابزار مفیدی در شبیه سازی جریان و منابع آلاینده آب هستند. مدل‌های هیدرولوژیک مبنای توزیعی یا نیمه‌توزیعی به‌طور گسترده با هدف برآورد اثر اقدامات یا فعالیت‌های مدیریتی بر کاهش منابع آلاینده آب به‌کار گرفته می شوند. برای مثال مدل‌هایی مانند HBV-NP در سوئد (۹،۸)، مدل PHYSIC (۲۴) و مدل HSPF ۵۵) در انگلستان، SWIM (۲۹) در آلمان و هم‌چنین مدل AnnAGNPS در ایالات متحده (۵۶) را می توان نام برد. با وجود مدل‌های مذکور و سایر ابزارهای شبیه‌سازی حوزه آبخیز، مدل SWAT[۱] (۲۷) که در ایالات متحده توسط آرنولد و همکاران (۱۲) توسعه یافته است، مدلی است که به‌طور گسترده در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی و بیوژئوشیمیایی و پیش‌بینی اثر تغییرات پوشش و کاربری اراضی و هم‌چنین فعالیت مدیریتی بر انتشار آلاینده‌ها در حوزه های آبخیز کوچک و بزرگ تحت کشاورزی در سطح بین‌المللی مورد استفاده قرار می گیرد (۴۴،۱۴،۶). با این حال مدل SWAT به عنوان یک مدل نیمه فیزیکی و مبتنی بر فرآیند برای شبیه‌سازی به داده‌های مکانی با کیفیت مناسب نیازمند است (۲۰). در ادامه چند مورد از مطالعات صورت گرفته از کاربرد این مدل شرح داده می شود. آبابایی و سهرابی (۱) در تحقیقی به منظور شبیه‌سازی دبی جریان زاینده‌رود از مدل SWAT استفاده کردند. آن‌ها به منظور تحلیل کیفیت نتایج مدل از سه شاخص آماری ضریب تعیین (R2)، راندمان نش- ساتکلیف (NS)[۲] و ضریب راندمان استفاده کردند. در پژوهش آن‌ها نتایج واسنجی با استفاده از ضرایب راندمان، NS و همبستگی به‌ترتیب بین ۶۰ تا۸۰، ۵۹ تا ۷۹ و ۷۲ تا ۸۲ درصد محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی نیز ضرایب راندمان، NS و همبستگی به ترتیب بین ۶۰ تا ۷۲، ۶۰ تا ۶۹ و ۶۴ تا۷۰ درصد برای ایستگاه‌های مختلف گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل SWAT می‌تواند ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی شدت جریان رودخانه باشد. ذهیبون و همکاران (۵۶) در پژوهشی به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب خروجی حوزه قره‌سو از مدل SWAT استفاده کردند. آن‌ها مدل برای دوره پایه ۱۹۷۱- ۲۰۰۰ واسنجی و اعتبارسنجی سپس برای کاهش مقیاس سناریو اقلیمی از مدل اقلیمی (HadCM3)[۳] تحت سناریو $A_2$ از مجموع سناریوهای (SRES)[۴] استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که رواناب خروجی از ۹۰ تا ۱۲۰ درصد در ماه‌های مختلف متغیر است. حسینی و همکاران (۳۰) در حوزه آبخیز طالقان به منظور بررسی روند تغییرات جریان سطحی، زیرسطحی و زیرزمینی از

1- Soil and Water Assessment Tool
2- Nash–Sutcliffe
3- Hadley Centre Coupled Model
4- Special Report on Emissions Scenarios

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]
[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

مدل SWAT استفاده کردند. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی سالانه و ماهانه در تحقیق آن‌ها نشان داد که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در سطح احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری را نداشته و همچنین یافته‌های آن‌ها طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ افزایش تصاعدی جریان سطحی به میزان ۷/۳ درصد و کاهش جریانات زیرقشری و زیرزمینی به ترتیب ۱۱/۳ و ۱۱ درصد را نسبت به سال‌پایه نشان داد. عباس‌پور و همکاران (۴) با استفاده از مدل SWAT به شبیه‌سازی دبی، رسوب و نیترات یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه راین در شمال شرق سویس پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش SUFI-2 به واسنجی و آنالیز عدم اطمینان پرداختند. در پژوهش آنان نتایج حاصل از شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در شبیه‌سازی دبی، رسوب و نیترات بسیار خوب گزارش شد. لام و همکاران (۳۲) برای بررسی اثر طولانی مدت بهترین شیوه‌ی مدیریتی بر کمیت و کیفیت آب در حوزه‌ی آبخیز کیلستاو در شمال آلمان از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج مدل در شبیه‌سازی دبی، رسوب و بار مغذی در حوزه مذکور رضایت‌بخش بود. کاویان و همکاران (۳۱) در حوزه آبخیز هراز استان مازندران با استفاده از مدل SWAT به شبیه سازی دبی و رسوب پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده-های مشاهده‌ای ماهانه‌ی دبی و رسوب چهار ایستگاه هیدرومتری و همچنین با استفاده از شاخص های آماری $R^2$، NS و RMSE به واسنجی و صحت‌سنجی مدل پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که مدل در شبیه سازی دبی و رسوب در هر چهار ایستگاه موفق عمل کرده است. تسفاهونگن و همکاران (48) در حوزه آبخیز میا- نگوس واقع در شمال اتیوپی به منظور تعیین و اولویت‌بندی نقاط حساس به فرسایش، برآورد رواناب و هدررفت بارمغذی از مدل SWAT استفاده کردند. آن‌ها در تحیق خود گزارش کردند که ۴۵ درصد حوزه دارای فرسایش زیاد (۳۰ تا۵۰ تن در هکتار در سال) و خیلی زیاد (بیش از ۵۰ تن در هکتار در سال) می‌باشد. هم‌چنین ایشان ۶ زیرحوزه را معرفی کرد که به دلیل رواناب مازاد، تولید رسوب و بارمغذی به اقدامات مدیریتی مناسب نیاز دارد. مولینا ناوارو و همکاران (۳۴) در حوزه آبخیز رودخانه‌ی تاگوساسپانیا با مساحت حدود ۸۸ کیلومتر مربع با استفاده از مدل SWAT اثر سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر رژیم جریان و انتقال مواد مغذی به مخازن حوزه را شبیه‌سازی کردند. ایشان بیان کردند که در سال‌های ۲۰۸۰ و ۲۱۰۰ دبی جریان تا ۴۸ درصد کاهش خواهد یافت و هم‌چنین دو عامل کوددهی و فرسایش خاک از عوامل مهم تاثیرگذار بر تمرکز مجموع نیتروژن و فسفر آب می‌باشند و هم‌چنین اثر ترکیبی تغییر اقلیم و تغییر کاربری باعث افزایش بیش‌تر انتقال موادمغذی می‌شود. پانگپچ و همکاران (۳۸) در حوزه‌ی آبخیز رودخانه لام تاکونگ به‌منظور ارزیابی مناطق بحرانی و اثر بهترین شیوه‌ی مدیریتی در تولید رسوب و نیترات آب از مدل SWAT استفاده کردند. آن‌ها مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای دبی، رسوب و نیترات برای دوره‌ی ۲۰۰۸-۲۰۰۷ واسنجی و سپس برای سال ۲۰۰۹ صحت‌سنجی شد. آن‌ها در تحقیق خود ضریب $R^2$ و NS را برای دبی و رسوب بیش از ۰/۵ و PBIAS نیز کمتر از ۲۵ درصد گزارش کردند. ضریب $R^2$ و NS برای نیترات نیز بیش از ۰/۶ و PBIAS نیز کمتر ۰/۲۵ به‌دست آمد. هم‌چنین این مدل ابزاری مناسب در مدیریت منابع آب و برنامه‌های حفاظت خاک حوزه مورد مطالعه بود. کاستیلو و همکاران (۱۹) در طی تحقیقی در حوزه‌ی آبخیز ساحلی رودخانه‌ی آرانساز تگزاس با استفاده از مدل SWAT و سناریو سازی اثرات مستقل و ترکیبی تغییرات کاربری، پوشش اراضی و الگوهای بارندگی را بر کیفیت آب رودخانه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که در مقیاس حوزه‌ی آبخیز تغییرات اقلیمی نسبت به تغییرات کاربری تاثیر بیشتری بر انتقال رسوب وکیفیت آب دارد. آنها هچنین خاطر نشان کردند که در مدل سازی هیدرولوژیکی در مقیاس حوزه آبخیز توجه به خصوصیات ژئومورفیک جریان ضروری است. عباس‌پور و همکاران (۳) برای شبیه‌سازی هیدرولوژی و کیفیت آب در مقیاس قاره اروپا از مدل SWAT استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار SWAT-Cup روش SUFI-2 به واسنجی، صحت‌سنجی، آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که از این مدل می‌توان در مقیاس‌های زمانی- مکانی بزرگ استفاده کرد. زاهدی و همکاران (۵۷) به شبیه‌سازی جریان زیرسطحی برای تعیین مناطق مستعد احداث سد زیرزمینی با استفاده از مدل SWAT در حوزه آبخیز رودخانه درونگر درگز پرداختند. ایشان بیان نمودند که در مرحله واسنجی مقادیر ضریب همبستگی، ضریب همبستگی وزنی و شاخص NS به‌ترتیب برابر با ۰/۷۷، ۰/۷۵ و ۰/۶۵ و در مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/۷۱، ۰/۶۷ و ۰/۶۱ حاصل گردید که این ضرایب نشان می‌دهد مدل SWAT با توجه به نتایج حاصل از شبیهسازی، در حوزه درونگر کارایی قابل قبولی داشت. نتایج حاصل از بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که این مدل با اهداف مختلف به‌طور گسترده در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. حتی در مواردی عمل‌کرد مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه حتی در حوزه‌های آبخیز با آمار هیدرولوژیکی ضعیف رضایت‌بخش گزارش شده است (۴۲). هدف این تحقیق شبیه سازی دبی، رسوب و نیترات در حوزه آبخیز تالار با استفاده از مدل SWAT می‌باشد و برای آنالیز حساسیت پارامترها، واسنجی و صحت‌سنجی نتایج مدل نیز از برنامه SWT-CUP و روش SUFI-2 استفاده خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

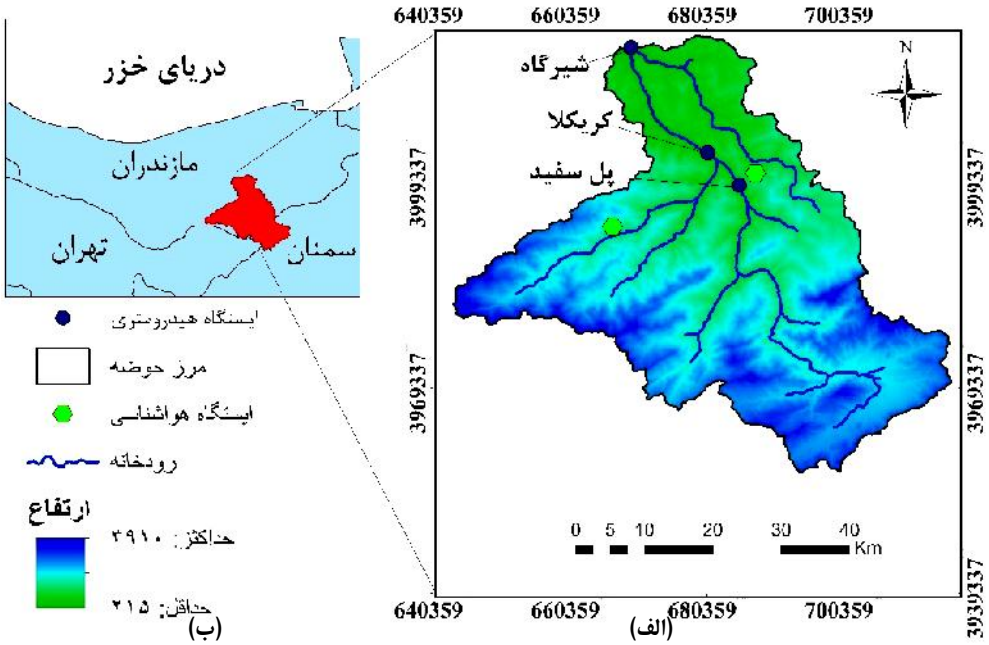
### موقعیت منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز تالار یکی از حوزه‌های آبخیز کوهستانی شمال کشور با مساحت ۲۱۰۰۸۸/۷ هکتار در البرز مرکزی و در دو طرف جاده آسفالته تهران- قائم شهر واقع شده است. حوزه آبخیز مورد مطالعه حد واسط ۵۲ درجه و ۳۵ دقیقه و ۲۲/۲ ثانیه الی ۵۳ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۴ ثانیه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۳/۰۶ ثانیه الی ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه و ۱/۶ ثانیه عرض شمالی واقع شده است و توسط یک رودخانه به نام تالار که امتداد اصلی جنوب به شمال است

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

زهکش می‌شود و سرشاخه‌های مهم آن می‌توان رودخانه‌های سرخ آباد، شورآب، کبیر، بزلا، چرات، و شش رودبار را اشاره کرد. حوزه آبخیز تالار دارای ارتفاعات مهمی هم‌چون برف پاجون، وزراک، چیلکا شمعدان، چماز، سامان سی، چهارتب، سیدلت، تروا، کنددره، سیاه کو، بشم، سیاه دره، آسمان لو، شاه محمدقله و علم دارو می‌باشد. بلندترین ارتفاع در منتهی‌الیه شمال غرب حوزه، قله کوه شلجمار زردین با ارتفاع ۳۹۱۰ و کم‌ترین ارتفاع در خروجی حوزه با ارتفاع ۲۱۵ متر از سطح دریای آزاد قرار گرفته است.




شکل ۱- موقعیت حوزه تالار در استان مازندران (الف) و همچنین موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در حوزه تالار (ب)
Figure 1. The location of Talar watershed in Mazandran province (a) and also the location of used stations in Talar watershed

شکل عمومی حوزه پهن و دارای امتداد شمالی- جنوبی بوده و میانگین ارتفاع آن ۲۰۰۱/۱۳ می باشد. ۱۱/۵۵ درصد از حوزه دارای شیب کمتر از ۱۲ درصد، و ۱۴/۲۱ درصد از کل حوزه دارای شیب تند بیش از ۶۰ درصد و ۵۸/۵۲ درصد از کل حوزه دارای شیب بیش از ۳۰ درصد می باشد (مطالعات جامع حوزه آبخیز تالار، ۱۳۸۰).

**مدل SWAT و توصیف تئوری مدل SWAT**

مدل SWAT یک مدل نیمه‌فیزیکی، نیمه‌توزیعی و پیوسته می‌باشد که برای پیش‌بینی اثرات مدیریتی بر هیدرولوژی، رسوب و مواد آلاینده‌های کشاورزی در حوزه‌های آبخیز با انواع خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت طراحی شده است (۱۲). این مدل با تقسیم حوزه‌ی آبخیز به چندین زیرحوزه، امکان شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوریکی با در نظر گرفتن جزئیات مکانی را فراهم می‌آورد. مولفه‌های اصلی این مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، فرسایش، رشد گیاه، مواد مغذی، آفت‌کش، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می باشد (۱۲). در این مدل ناهمگنی‌های وسیع حوزه آبخیز در منطقه مطالعه توسط زیرحوزه‌ها نمایش داده می‌شود. سپس هر زیرحوزه بر اساس نوع خاک، کاربری اراضی و شیب به واحدهای هیدرولوژیکی یکسان (HRU)[1] تقسیم می‌شود. در هر HRU محتوای آب موجود در خاک، رواناب سطحی، چرخه‌ی مواد مغذی، تولید رسوب، رشد محصولات و فعالیت‌های زراعی و مدیریتی شبیه‌سازی می‌گردد. خصوصیات فیزیکی شامل شیب، طول بازه‌ی آبراهه‌ها و داده‌های اقلیمی برای هر زیرحوزه در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت، مدل SWAT برای داده‌های اقلیمی از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه به زیرحوزه‌ها استفاده می‌کند. دبی جریان، تولید رسوب و آلاینده‌ها ابتدا برای هر زیرحوزه محاسبه می‌شود و سپس در سیستم رودخانه روندیابی می‌شوند. روندیابی درون آبراهه نیز به‌وسیله متغیر ذخیره یا روش ماسکینگام شبیه‌سازی می‌شود. آب در درون هر زیرحوزه به چهار صورت برف، در پروفیل خاک (۰-۲ متر)، آب‌خوان کم‌عمق (۲-۲۰ متر) و هم‌چنین در آب‌خوان‌عمیق. رواناب سطحی به‌وسیله‌ی بارش روزانه ذخیره می‌شود و

1- Hydrologic Response Units

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]
[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

براساس روش شماره منحنی اصلاح شده محاسبه می‌شود و مقدار آن به نوع کاربری، خاک و رطوبت پیشین خاک بستگی دارد. اوج رواناب به‌وسیله فرمول تجربی اصلاح شده (۲۱) و زمان تمرکز با در نظر گرفتن جریان سطحی و آبراهه‌ای توسط فرمول منینگ برآورد می شوند.

حرکت جریان به سمت پایین زمانی رخ می‌دهد که از آستانه ظرفیت زراعی لایه خاک تجاوز کند و هم‌چنین لایه پایینی اشباع نباشد. آب‌خوان نیز توسط آخرین لایه اشباع خاک تغذیه می‌شود. متوسط دمای خاک با استفاده از دمای حداکثر و حداقل روزانه تعیین می‌شود. اگر دمای خاک برابر یا کمتر از صفر شود تراوش صورت نمی‌گیرد. جریان جانبی زیر سطحی در پروفیل خاک همزمان با تراوش شبیه‌سازی می شود. جریان آب زیرزمینی در جریان کلی نقش دارد که توسط مولفه‌ی روندیای جریان از آب‌خوان کم‌عمق به آبراهه شبیه‌سازی می‌شود (۱۰).

تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس داده‌های موجود بر اساس رابطه‌ی پنمن- مانتیس (۳۵)، پریستلی تیلور (۴۱)، یا روش هارگریوز (۲۸) محاسبه می‌شود. توصیف دقیق‌تر جزئیات مدل درمطالعات آرنولد و همکاران (۱۱) موجود است. تولید رسوب در مدل SWAT از طریق معادله جهانی فرسایش خاک اصلاح شده برآورد می‌شود (۵۴). مدل روندیابی رسوب شامل دو مرحله ته‌نشست[1] و فرسایش[2] می‌باشد که هم‌زمان عمل می‌کند. سرعت ته‌نشینی با استفاده از قانون استوک تعیین شده (۲۱) و محاسبات به عنوان تابعی از مربع قطر ذرات انجام می‌گیرد. نسبت تحویل رسوب برای هر اندازه ذرات به عنوان یک تابع خطی از سرعت سقوط، زمان جابجایی و عمق جریان برآورد شده‌است. فرسایش آبراهه‌ای نیز مبتنی بر مفهوم قدرت جریان بگنولد است (۵۴،۱۳).

در این مدل چرخه موادمغذی شبیه به مدل EPIC[3] می‌باشد. تحولات بیوشیمیایی ازت و فسفر شبیه سازی شده توسط مدل SWAT در شکل (۲) نشان داده شده است. مدل‌سازی کیفیت آب در رودخانه بر اساس مدل QUAL2E می‌باشد (۱۶) که شامل تعاملات مهم چرخه مواد مغذی، تولید جلبک‌ها و نیاز اکسیژن آبی[4] است.

**SWAT-CUP**

مدل SWAT-CUP برای یکپارچه‌سازی برنامه‌های آنالیز حساسیت و واسنجی با استفاده از رابطه‌های مختلف برای مدل SWAT طراحی شده است. در این تحقیق پارامترهای مختلف SWAT مربوط به دبی و رسوب و نیترات با استفاده از روش بهینه‌سازی SUFI2 برآورد شد. آماره‌های استفاده شده در این روش شامل Sum[5]، $R_2$[6]، NS[7]، Chi2[8]، br2[9] و SSQR[10] می‌باشد. تنها یک تابع هدف در طول زمان کالیبراسیون استفاده می‌شود. توصیف کامل نرم‌افزار SWAT-CUP در مطالعه عباس‌پور (۲) ارائه گردیده‌است.

**SUFI-2 به عنوان الگوریتم بهینه‌ساز**

از آنجایی‌که انتخاب مقادیر مناسب برای واسنجی مدل محدود بوده و روشی وقت‌گیر و پرهزینه است، مدل‌سازی معکوس[11] به‌عنوان روشی مناسب برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت استفاده می شود. مدل SUFI-2 در واقع معکوس مدل SWAT عمل می‌کند یعنی با گرفتن داده‌های مشاهده‌ای و محدوده مجاز پارامترهای مدل که در واسنجی نقش دارد (۴). به‌خاطرکمبود اطلاعات فرض می‌شود تمام پارامترها به طور یکنواخت در دامنه توزیع می‌شوند (۲۶).

**مدل‌سازی هیدرولوژیکی**

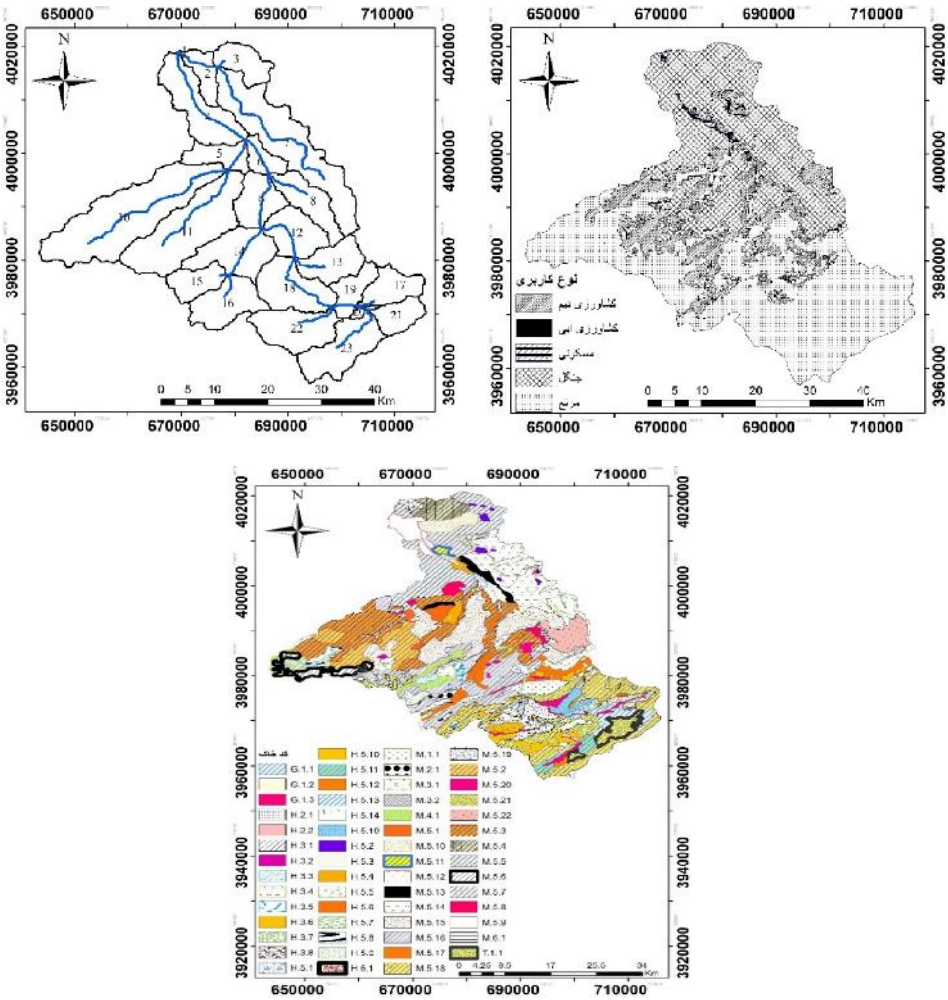
داده‌های مورد استفاده برای اجرای مدل SWAT داده‌های اقلیمی (میانگین بارندگی روزانه، متوسط دمای حداقل و حداکثر روزانه، متوسط رطوبت نسبی روزانه، انرژی خورشیدی و سرعت باد روزانه) و همین‌طور نقشه‌ها بوده که از پایگاه‌های داده و سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری گردید. نقشه DEM با دقت ۳۰ متر، نقشه کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ با ۵ کلاس کاربری (جنگل، مرتع، کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی به ترتیب با مساحت ۳۴/۷۹، ۴۸/۷۹، ۱۴/۸۱، ۰/۷۱ و ۰/۸۹ درصد از مساحت کل حوزه) و نقشه خاک با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ به همراه جدول توصیفی ۵۸ نوع خاک مختلف از اداره کل منابع طبیعی استان مازندران تهیه شد (شکل ۲).

پس از بازبینی و پیش‌پردازش داده‌ها از نرم‌افزار ArcSWAT Version 2012.10_1.15 که الحاقیه نرم‌افزار ArcMap 1.1 می‌باشد برای پارامترسازی و ایجاد مولفه‌های هیدرولوژیکی مدل استفاده شد. جدول (۱) خصوصیات آماری پارامترهای مورد استفاده از جدول خاک را نشان می‌دهد.

با استفاده از نقشه DEM حوزه آبخیز تالار را به ۲۳ زیر حوزه تقسیم شد. منطقه به ۵ کلاس شیب ۵-۰ درصد، ۱۰-۵ درصد، ۲۰-۱۰ درصد، ۴۰-۲۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد کلاس‌بندی شد. در نهایت با تلفیق نقشه خاک، کاربری‌اراضی و شیب حوزه آبخیز تالار بر اساس ویژگی‌های غالب منطقه همانند زیرحوزه‌ها به ۲۳ واحد پاسخ هیدرولوژیکی همگن (HRU) تقسیم شد. در مرحله بعد پس از وارد کردن داده‌های اقلیمی مدل سال‌های ۲۰۰۰/۱/۱ تا ۲۰۱۴/۷/۳۱ اجرا شد. سال ۲۰۰۰ نیز به عنوان Warm up در نظر گرفته شد. دبی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ماهانه ایستگاه شیرگاه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ واسنجی و سپس با استفاده از داده‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ صحت‌سنجی شد. در نهایت با استفاده از داده‌های متوسط نیترات محلول ماهانه برای ایستگاه شیرگاه، از داده‌های سال ۲۰۱۲ برای واسنجی و با استفاده از داده‌های سال ۲۰۱۳ به صحت سنجی نیترات اقدام گردید.

1- Deposition
2- Degradation
3- Environmental Policy Integrated Climate
4- Benthic Oxygen Demand
5- A summation form of the square error
6- Coefficient of determination
7- Nash-Sutcliffe
8- Chi-squared $\chi 2$
9- Coefficient of determination $R^2$ multiplied by the coefficient of the regression line
10- Sum of square of residual
11- Inverse Modeling

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]
[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]




شکل ۲- نقشه زیرحوزه (الف)، کاربری اراضی (ب) و خاک (ج) حوزه آبخیز تالار
Figure 2. The sub-watershed (a), land use (b) and soil map of (c) Tallar watershed

جدول ۱- خصوصیات آماری ۵۸ نمونه خاک مختلف در منطقه
Table 1. The statistical characteristics of 58 various soil samples in region

| | میانگین | انحراف معیار | ضریب تغییرات | حداقل | میانه | حداکثر | دامنه | چولگی | کشیدگی |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| چگالی | ۱/۴۶ | ۰/۱۱ | ۸/۰۸ | ۱/۱۰ | ۱/۴۸ | ۱/۶۴ | ۰/۵۴ | -۱/۴۰ | ۲/۷ |
| آب خاک | ۰/۲۲ | ۰/۲۶ | ۱۱۹/۴۹ | ۰/۰۸ | ۰/۱۷ | ۱/۶۰ | ۱/۵۲ | ۵/۱۱ | ۲۵/۴۹ |
| هدایت هیدرولیکی | ۱۲/۷۰ | ۳۲/۲۸ | ۱۸۳/۳۲ | ۳/۹۷ | ۷/۲۶ | ۱۷۰ | ۱۶۷/۰۳ | ۵/۸۷ | ۳۸/۱۹ |
| ماده آلی | ۱/۷۴ | ۱/۴۲ | ۸۱/۵۵ | ۰/۰۴ | ۱/۲۹ | ۷/۹۲ | ۷/۸۸ | ۲/۲۲ | ۶/۷۱ |
| رس | ۵۲/۱۶ | ۱۰/۱۷ | ۶۱/۵۸ | ۳ | ۱۷ | ۷۴ | ۷۱ | ۳/۲۶ | ۱۷/۴۴ |
| سیلت | ۵۵/۵۷ | ۱۵/۶۶ | ۲۷/۲۱ | ۱۸ | ۵۸ | ۹۷ | ۷۹ | -۰/۴۲ | ۰/۴۹ |
| شن | ۲۵/۹۳ | ۱۱/۵۳ | ۴۴/۴۸ | ۰ | ۲۵ | ۶۶ | ۶۶ | ۱/۳۷ | ۳/۴۸ |
| USLE_K | ۰/۴۳ | ۰/۱۳ | ۳۰/۴۲ | ۰/۱۶ | ۰/۴۲ | ۰/۷۵ | ۰/۵۹ | -۰/۰۴ | -۰/۲۴ |

## روش‌های ارزیابی مدل

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی دبی و نیترات به‌وسیله مشاهده‌ی هیدروگراف‌ها و هم‌چنین شاخص‌های آماری مانند ضریب نش- ساتکلیف، ضریب تعیین و PBIAS ارزیابی شد.

### ضریب نش- ساتکلیف (NS)

مقدار این فاکتور بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. هرچه میزان ضریب NS به مقدار ۱ نزدیک‌تر باشد نتایج حاصل از تاثیر بیشتری برخوردار است (رابطه (۱)) (۳۷).

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]
[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

(رابطه ۱)
$$NS = 1 - \frac{\sum i\,(Q_m - Q_s)_i^2}{(Q_{m,i} - Q^-_m)^2}$$

که در آن $Q_m$ دبی مشاهده‌ای (مترمکعب بر ثانیه)، $Q_s$ دبی شبیه‌سازی (مترمکعب بر ثانیه)، $Q^-_m$ دبی متوسط مشاهده ای (مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد.

### ضریب تعیین ($R^2$)

مقدار آن بین ۰ تا ۱ متغیر بوده و $R^2$ نزدیک به ۱ نشان دهنده‌ی نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای می‌باشد.

(رابطه ۲)
$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - Q^-_m)(Q_{S,i} - Q^-_s)\right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - Q^-_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - Q^-_s)^2}$$

### درصد انحراف (PBIAS)

این شاخص افزایش یا کاهش درصد متوسط تمایل داده‌های شبیه‌سازی شده را نسبت به داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد و مقدار مطلوب صفر است. مقدار مثبت و منفی به‌ترتیب نشان دهنده‌ی کم و بیش تخمینی مدل است (۲).

(رابطه ۳)
$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^{n} |Q_m - Q_s|_i}{\sum_{i=1}^{n} Q_{m,i}}$$

## نتایج و بحث

### آنالیز حساسیت

به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی و کم کردن اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در مرحله واسنجی، صحت‌سنجی و آنالیز حساسیت پارامترها و آنالیز عدم اطمینان از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI-2 استفاده شد. از آنجایی‌که مدل‌های کیفیت آب دارای پارامترسازی جامع بوده و مجموعه داده‌های مختلفی مانند دبی، رسوب، نیتروژن و فسفات برای مقایسه‌ی پیش‌بینی‌های مدل وجود دارد، لذا آنالیز حساسیت به منظور تعدیل شمار زیادی از پارامترها با توجه به متغییرهای خروجی مختلف مورد نیاز می باشد (۴۴). همچنین بلود و مادراموتو (۱۶) ذکر کردند که آنالیز حساسیت بایستی قبل از واسنجی انجام شود تا مشخص گردد کدام پارامتر به چه میزان در طی دوره‌ی واسنجی به تعدیل نیاز دارد. برای تحلیل حساسیت دبی و نیترات به ترتیب از ۲۵ و ۱۱ پارامتر استفاده شد (جدول ۲ و ۴) و واسنجی و صحت سنجی آن‌ها به‌صورت جداگانه صورت گرفت. تعیین بازه‌ی این پارامترها نیز بر اساس دستورالعمل مدل SWAT انتخاب شد (۱۴). جدول (۲) نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای دبی را نشان می دهد.

جدول ۲- آنالیز حساسیت پارامترهای دبی

Table 2. Sensitivity analysis of discharge parameters

| رتبه حساسیت | نام پارامتر | معرفی پارامتر | حداقل | حداکثر | مقدار بهینه |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | CN2 | شماره‌ی منحنی | ۰ | ۱ | ۰/۵۷۲ |
| ۲ | SMTMP | دمای ذوب توده برف | -۲۰ | ۲۰ | -۲/۰۹۷ |
| ۳ | SOL_BD | چگالی خاک در حالت مرطوب | ۰/۹ | ۲/۵ | -۰/۳۲۵ |
| ۴ | SFTMP | نرخ ذوب برف در ۲۱ دسامبر | -۲۰ | ۲۰ | ۸/۶۸۸ |
| ۵ | ALPHA_BNK | ضریب آلفا آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال | ۰ | ۱ | ۰/۱۱۶ |
| ۶ | SOL_K | هدایت هیدرولیکی لایه‌های خاک اشباع | ۰ | ۲۰۰۰ | ۰/۵۱۹ |
| ۷ | SMFMN | نرخ ذوب برف در ۲۱ دسامبر | ۰ | ۱۰ | ۱/۷۳۸ |
| ۸ | SOL_AWC | ضریب آب قابل دسترس خاک | ۰ | ۱ | ۰/۰۵۸ |
| ۹ | SLSUBBSN | متوسط طول شیب دره HRU | ۱۰ | ۱۵۰ | ۱/۸۱۶ |
| ۱۰ | REVAPMN | حداقل مقدار ذخیره آب در سفره که برای شروع تبخیر ناشی از نیروی مویینگی | ۰ | ۵۰۰ | ۲۴۹/۲۳۶ |
| ۱۱ | LAT_TTIME | زمان تاخیر رسیدن جریان‌های زیرسطحی به رودخانه در هر HRU | ۰ | ۱۸۰ | -۱۵/۵۰۸ |
| ۱۲ | CANMX | برگ آب | ۰ | ۱۰۰ | ۳۴/۹۳ |
| ۱۳ | TIMP | فاکتور تاخیر دمای فشرده‌سازی برف | ۰ | ۱ | ۰/۹۲۸ |
| ۱۴ | CH_N2 | ضریب مانینگ برای رودخانه اصلی | ۰ | ۱ | ۰/۵۲۷ |
| ۱۵ | GWQMN | حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستابی در سفره های کم عمق برای وقوع جریان | ۰ | ۵۰۰۰ | ۳۶۵۲/۸۲۳ |
| ۱۶ | SURLAG | ضریب تاخیر رواناب | ۱ | ۳۴ | ۰/۷۸۹ |
| ۱۷ | TLAPS | نرخ تغییرات دما با ارتفاع در هر زیرحوزه | -۱۰ | ۱۰ | ۶۷/۶۳۹ |
| ۱۸ | ESCO | ضریب تبخیر خاک | ۰ | ۱ | ۰/۴۷۲ |
| ۱۹ | GW_REVAP | ضریب تعیین نفوذ آب زیرزمینی عمیق | ۰ | ۱/۵ | ۰/۱۲۹ |
| ۲۰ | ALPHA_BF | ضریب آلفا آب زیرزمینی | ۰ | ۱ | -۰/۴۲ |
| ۲۱ | CH_K2 | ضریب مانینگ برای رودخانه اصلی | ۰ | ۱۵۰ | ۳۹/۴۹۸ |
| ۲۲ | GW_DELAY | زمان انتقال آخرین انتقال آب از آخرین لایه خاک به سطح آب زیرزمینی | ۰ | ۵۰۰ | ۲۸۷/۴۸۷ |
| ۲۳ | SMFMX | نرخ ذوب برف در ۲۱ ژوئن | ۰ | ۱۰ | ۲/۸۴۷ |
| ۲۴ | SOL_ALB | ضریب آلبیدوی خاک مرطوب | ۰ | ۰/۲۵ | ۰/۵۹ |
| ۲۵ | RCHRG_DP | درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق | ۰ | ۱ | ۰/۵۷۹ |

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که پارامتر CN2 در شبیه‌سازی دبی و پارامترهای کیفی آب به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر می‌باشند. از آنجایی‌که نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک بیش‌ترین تاثیر را بر روی مقادیر شماره منحنی دارد و این پارامتر یکی از مهم‌ترین پارامترها در مدل SWAT می‌باشد (۲۲، ۴۹ و ۶۰)، لذا در این تحقیق نیز این پارامتر رتبه نخست حساسیت در شبیه‌سازی جریان همچنین در شبیه‌سازی نیترات در سطح آبراهه به خود اختصاص داد. اهمیت پارامتر CN منطقی است، زیرا این پارامتر مقدار آب موجود را برای مولفه‌های مختلفی که بر دبی موثرند را تعیین می‌کند. در نتیجه این پارامتر تاثیر عمده‌ای بر مولفه‌های توازن آب و شبیه‌سازی جریان داشته و هم‌چنین انتقال موادمغذی مانند نیترات و فسفات و حلالیت متغیرهای کیفی آب را در بازه‌ی رودخانه کنترل می‌کند (۳۸ و ۵۷). سایر مطالعات مانند داس و همکاران (۲۳)، آرابی و همکاران (۶) و وانگ و همکاران (۵۱) نیز CN را به عنوان حساس‌ترین پارامتر معرفی کردند. بعد از CN پارامترهای دمای ذوب توده برف و چگالی خاک در حالت مرطوب بیش‌ترین حساسیت را در شبیه‌سازی دبی داشتند. جدول (۳) نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای نیترات را نشان می‌دهد.

جدول ۳- آنالیز حساسیت پارامترهای نیترات

Table 3. Sensitivity analysis of nitrate parameters

| رتبه حساسیت | نام پارامتر | معرفی | مقدار حداقل | مقدار حداکثر | مقدار بهینه |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | NPERCO | ضریب تراوش نیتروژن | ۰ | ۱ | ۱/۰۹۱ |
| ۲ | SDNCO | آستانه دینیتریفیکیشن آب | ۰ | ۱ | ۰/۵۰۹ |
| ۳ | ERORGN | نرخ غنی‌سازی نیتروژن آلی | ۰ | ۵ | ۰/۹۴۲ |
| ۴ | SOL_NO3 | تمرکز اولیه نیترات در لایه خاک | ۰ | ۱۰۰ | ۲۵/۶۹۹ |
| ۵ | SOL_ORGN | تمرکز اولیه نیترات آلی در لایه خاک | ۰ | ۱۰۰ | ۷۵/۰۹۶ |
| ۶ | N_UPDIS | پارامترتوزیع جذب نیتروژن | ۰ | ۱۰۰ | ۹۸/۹۱۱ |
| ۷ | RSDCO | ضریب تجزیه پسماند | ۰/۰۲ | ۱ | ۰/۰۳۱ |
| ۸ | SHALLST_N | تمرکز نیترات در آب زیرزمینی | ۰ | ۱۰۰۰ | ۵۵۳/۵۷۹ |
| ۹ | CMN | عامل نرخ معدنی شدن هوموس از نیتروژن آلی فعال | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۰۳ |
| ۱۰ | BC2 | نرخ ثابت اکسیداسیون NO2 به NO3 | ۰/۲ | ۲ | ۰/۱۷۴ |
| ۱۱ | RCN | تمرکز نیتروژن در باران | ۰ | ۱۵ | ۱/۷۲۷ |

با توجه به نتایج جدول (۳) برای نیترات نیز حساس‌ترین پارامتر CN تعیین شد. پس از آن پارامترهای کیفی مانند NPERCO، SDNCO، ERORGN، SOL_NO3، SOL_ORGN، N_UPDIS، RSDCO، SHALLST_N ، CMN، BC2 و RCN در رده‌های بعدی حساسیت قرار گرفتند.

**واسنجی و صحت‌سنجی دبی**

در این مطالعه برای واسنجی رواناب از داده‌های مشاهده‌ای ماهانه‌ی ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ برای ایستگاه هیدرومتری شیرگاه و برای صحت‌سنجی نیز از داده‌های سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ استفاده شد. ارزیابی مدل نیز با استفاده از شاخص‌های NS، R2، PBIAS، میانگین دبی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای، انحراف معیار دبی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای صورت گرفت. جدول (۴) شاخص‌های آماری را در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دبی را نشان می دهد. مشاهده هیدروگراف‌ها و شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که تناسب خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای ایجاد شده است (شکل‌های ۳ و ۴). مدل در واسنجی زمان اوج جریان را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده اما در شبیه‌سازی حجم رواناب در بیشتر نقاط اوج جریان مدل کم‌تخمینی داشته و فقط در ۴ ماه (ژانویه ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴، نوامبر ۲۰۰۲ و دسامبر ۲۰۰۷) مدل در شبیه‌سازی نقاط اوج جریان بیش‌تخمینی داشته است. همچنین با توجه به مثبت بودن ضریب PBIAS می‌توان گفت که به‌طور کلی مدل در شبیه‌سازی جریان در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دارای بیش‌تخمین بوده است که مقدار آن به ترتیب ۴/۲ و ۵/۳ محاسبه شد. با توجه به گراف‌های واسنجی و صحت‌سنجی در بیشتر ماه‌ها مدل در شبیه‌سازی جریان حداکثر کم تخمینی داشته است. شکل (۵) نیز میزان همبستگی داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای برای ایستگاه شیرگاه نشان داد که ضریب $R^2$ درمرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۶۵ شد.

جدول ۴- خصوصیات آماری ارزیابی مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی با گام زمانی ماهانه

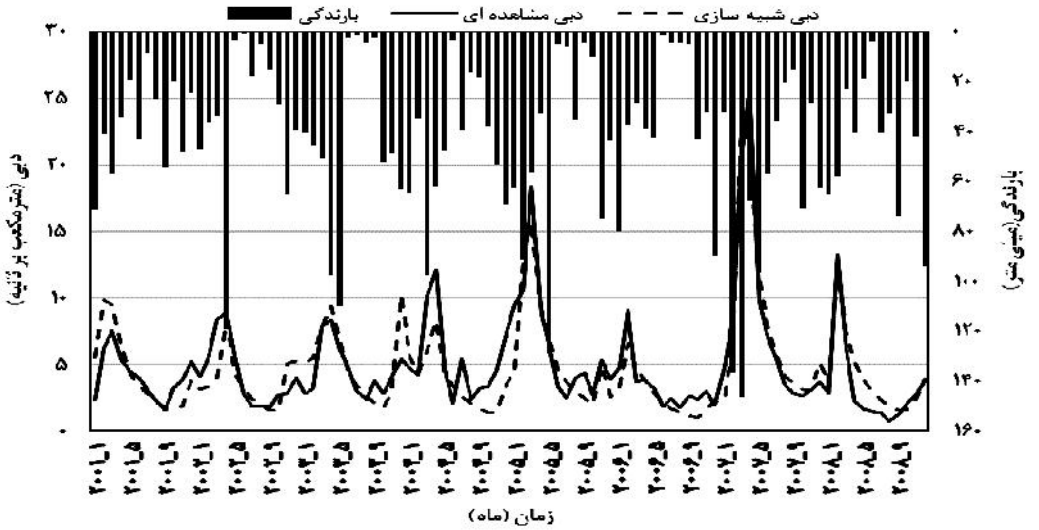
Table 4. The statistical characteristics of model evaluation in validation and calibration step with monthly time scale

| خصوصیات آماری | واسنجی (۲۰۰۱- ۲۰۰۸) | صحت سنجی (۲۰۰۹- ۲۰۱۳) |
|---|---|---|
| NS | ۰/۶۷ | ۰/۶۲ |
| R2 | ۰/۶۸ | ۰/۶۵ |
| PBIAS | ۴/۲ | ۵/۳ |
| میانگین دبی شبیه‌سازی ($m^3 s^{-1}$) | ۴/۷۲ | ۵/۰۱ |
| میانگین دبی مشاهده‌ای ($m^3 s^{-1}$) | ۴/۸۳ | ۵/۱۹ |
| انحراف معیار دبی شبیه‌سازی ($m^3 s^{-1}$) | ۳/۵۱ | ۲/۷۹ |
| انحراف معیار دبی مشاهده‌ای ($m^3 s^{-1}$) | ۳/۹۴ | ۲/۸۷ |

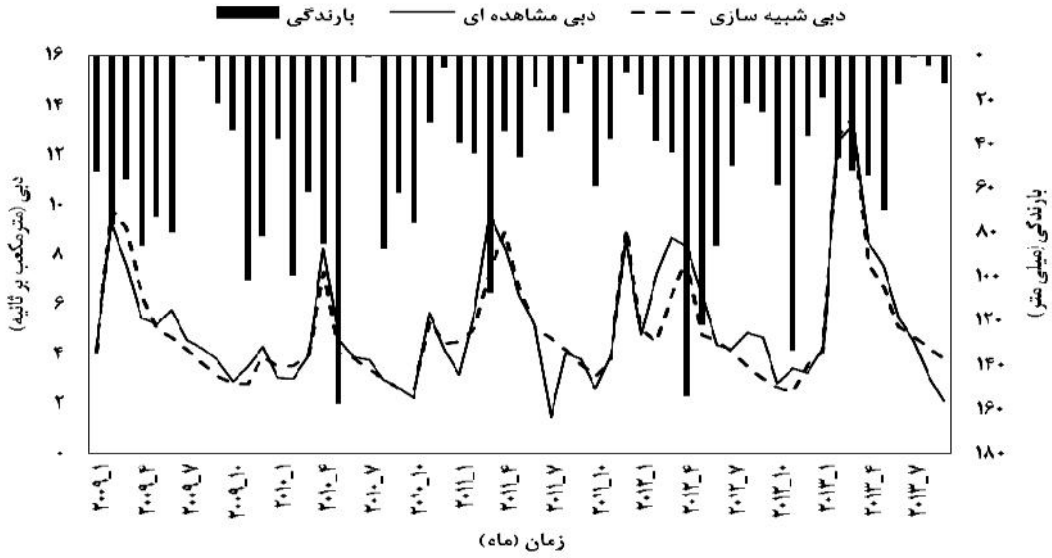
[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

برای صحت‌سنجی از داده‌های دبی مشاهده‌ای ماهانه برای دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ استفاده شد. ضریب NS برای ایستگاه شیرگاه ۰/۶۲به‌دست آمد که در مقایسه با دوره واسنجی اندکی کاهش یافت. موریاسی و همکاران (۳۶) بیان کردند که در مدل‌سازی با مدل SWAT ضریب NS ۰/۷۵ تا ۱ را خیلی خوب، ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ خوب، ۰/۵ تا ۰/۶۵ را رضایت بخش و کمتر از ۰/۵ را نامطلوب می‌باشد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی دبی با نتایج مطالعات صورت گرفته مانند دمیسه و همکاران(۲۵)، شاو و همکاران(۴۵)، بلواد و مادراموتو (۱۶) و زاهدی و همکاران (۵۷) هم‌خوانی دارد. لازم به ذکر است که با توجه به سطح وسیع حوزه و کمبود و توزیع نامناسب ایستگاه‌های بارندگی ضرایب حاصل شده برای هر سه ایستگاه در شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی بسیار رضایت‌بخش می‌باشد زیرا که تعداد و مکان قرارگیری ایستگاه‌های بارندگی به شدت در دقت و صحت شبیه‌سازی مدل SWAT اثرگذار است (۱۸).

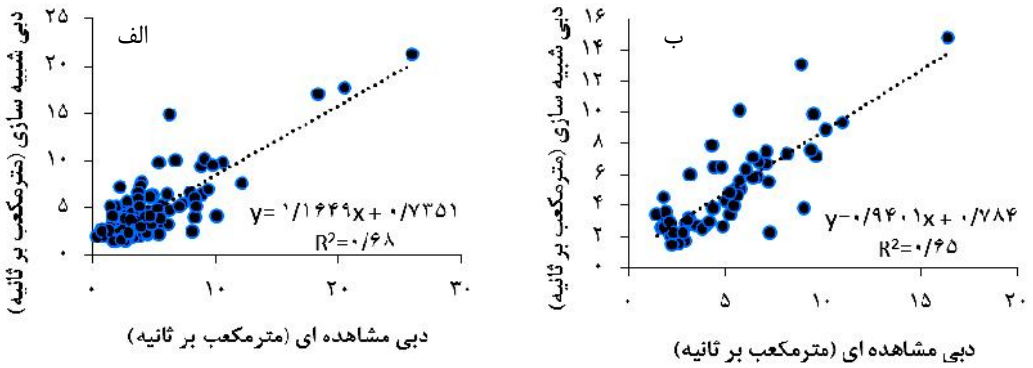



شکل۳- نتایج حاصل از واسنجی شبیه‌سازی رواناب ایستگاه هیدرومتری شیرگاه
Figure 3. The obtained results from simulation calibration of runoff in Shirgah hygrometry station




شکل ۴- نتایج حاصل از صحت‌سنجی شبیه‌سازی رواناب ایستگاه هیدرومتری شیرگاه
Figure 4. The obtained results from simulation validation of runoff in Shirgah hygrometry station

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]
[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]




شکل ۵- همبستگی داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی دبی (الف) و مرحله صحت‌سنجی دبی (ب) در ایستگاه شیرگاه
Figure 5. The simulated and measured data correlation in step discharge calibration (a) and step of discharge validation (b) in Shirgah station

**واسنجی و صحت‌سنجی نیترات**

واسنجی و صحت‌سنجی نیترات در مدل SWAT به دلیل پیچیدگی مولفه‌های نیتروژن و داده‌های فراوان اهمیت زیادی دارد. واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ماهانه به‌ترتیب سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ انجام شد. جدول (۵) نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی نیترات را نشان می‌دهد.

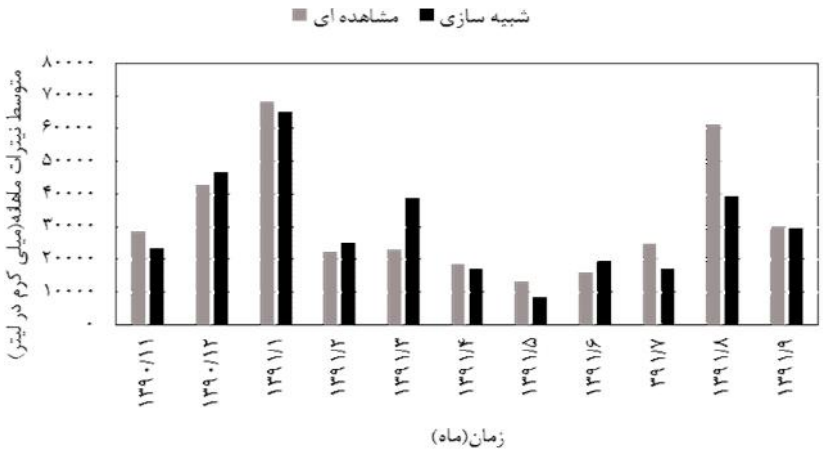
جدول ۵- خصوصیات آماری ارزیابی مدل در مرحله واسنجی (۲۰۱۲) و مرحله صحت‌سنجی (۲۰۱۳) نیترات با گام زمانی ماهانه
Table 5. The statistical characteristics of model evaluation in calibration step (2012) and validation step (2013) of nitrate with monthly time scale

| خصوصیات آماری | واسنجی (۲۰۱۲) | صحت‌سنجی (۲۰۱۳) |
|---|---|---|
| NS | ۰/۷۴ | ۰/۶۲ |
| $R^2$ | ۰/۷۵ | ۰/۸۳ |
| PBIAS | ۵/۴ | -۴۱/۳ |
| میانگین نیترات شبیه‌سازی (میلی گرم در مترمکعب) | ۳۰۱۱۶/۸۲ | ۲۷۹۲۴/۱۱ |
| میانگین نیترات مشاهده‌ای (میلی‌گرم در مترمکعب) | ۳۱۸۵۰ | ۱۹۷۶۲/۳۳ |
| انحراف معیار نیترات شبیه‌سازی (میلی گرم در مترمکعب) | ۱۵۵۰۵/۰۶ | ۱۶۰۲۱/۰۹ |
| انحراف معیار نیترات مشاهده‌ای (میلی گرم در مترمکعب) | ۱۷۳۲۶/۲۰ | ۱۸۰۴۲/۳۱ |

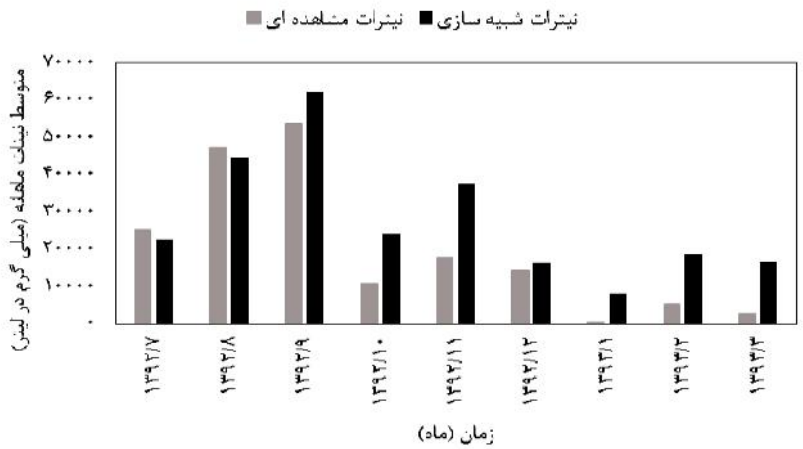
جدول (۵) نشان می‌دهد که ضریب NS برای دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۷۴و ۰/۶۲ و ضریب $R^2$ نیز به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۳ برآورد شد که نشان دهنده‌ی همبستگی بالای داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد که شکل ۱۲ نیز این همبستگی بالا را تاکید می‌نماید. با توجه به ضریب PBIAS نیز می‌توان گفت که مدل در طی دوره واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب دارای کم‌تخمینی و بیش‌تخمینی خصوصا در نقاط اوج بوده است. شکل‌های (۶ و ۷) به‌ترتیب نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی شبیه‌سازی نیترات آب را نشان می‌دهد. موریاسی و همکاران (۳۶) گزارش دادند که در شبیه‌سازی موادمغذی مانند N و P اگر ۷۰± < PBIAS < ۴۰± باشد نتایج مدل‌سازی را رضایت بخش و اگر ۰/۵۰ < NS < ۰/۶۵باشد نتایج مدل‌سازی خوب در نظر گرفته می شود که با نتایج به‌دست آمده مطابقت دارد. هم‌چنین وانگ و ملسه (۵۲) نیز ذکر کردند که برای مدل‌سازی با مدل SWAT به ضریب NS بیش‌تر از ۰/۵۰ و ضریب همبستگی بیش‌تر از ۰/۶۰ نیاز است که با نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیترات هم‌خوانی دارد. شکل (۹) نیز متوسط دبی سالانه و متوسط نیترات خروجی سالانه از هر زیرحوزه را برای کاربری اراضی سال ۲۰۰۶ نشان می‌دهد. جدول (۶) نشان می‌دهد که بیشترین دبی و نیترات خروجی به مربوط به زیرحوزه‌ی ۱ می‌باشد. کمترین دبی خروجی مربوط به زیرحوزه‌های ۳، ۸ و ۲۱ بوده که در دو زیرحوزه اول به ترتیب ۹۸ و ۷۵ درصد اراضی جنگلی هستند و در زیر حوزه‌ی ۲۱، اراضی مرتعی بیش از ۹۰ درصد را در این زیرحوزه پوشش می‌دهد.

در این تحقیق بیش‌ترین سهم تولید نیترات برای کاربری‌های اراضی مربوط به کشاورزی دیم بوده است که با نتایج آهران و همکاران (۵)، بهرا و پاندا (۱۵) و محمد و آدام (۳۳) همخوانی دارد. آن‌ها نیز در تحقیق خود اراضی کشاورزی دیم را مهمترین کاربری در تولید نیترات معرفی کرده اند. لازم به ذکر است بعد از اراضی کشاورزی دیم، جنگل بیشترین سهم را در تولید نیترات داشته است که علت آن تجزیه شدید مواد آلی در محیط‌های جنگلی و پس از آن ایجاد نیتروژن آلی می‌تواند به همراه بارش باران هدررفت نیترات را از اراضی جنگلی به دنبال داشته باشد (۵۹،۴۶،۵۷).

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]
[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]



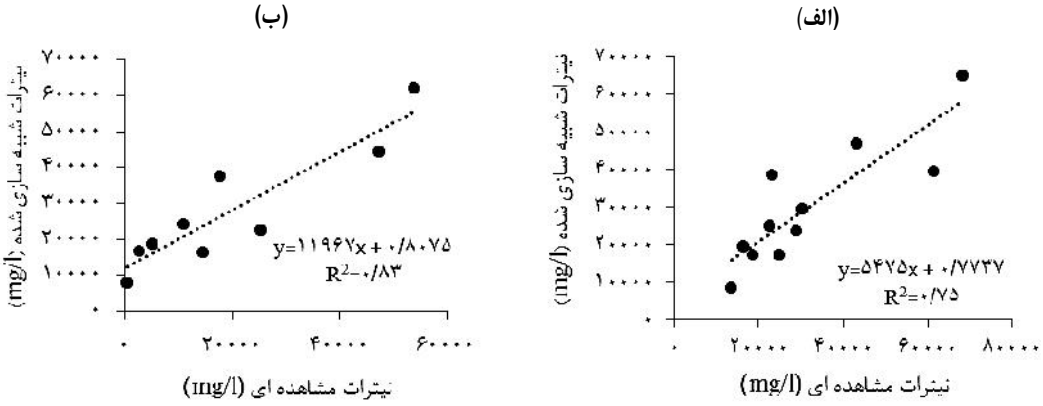

شکل ۶- نتایج حاصل از واسنجی برای شبیه‌سازی نیترات آب در ایستگاه هیدرومتری شیرگاه
Figure 6. The obtained results from calibration for nitrate simulation of water in Shirgah hygrometry station



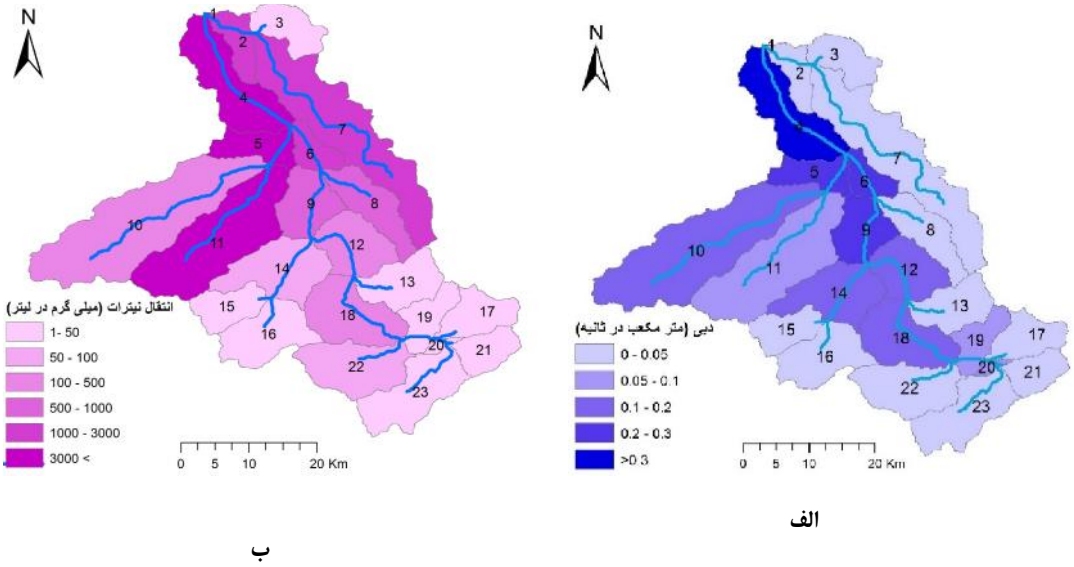

شکل ۷- نتایج حاصل از صحت‌سنجی برای شبیه‌سازی نیترات آب در ایستگاه هیدرومتری شیرگاه
Figure 7. The obtained results from validation for nitrate simulation of water in Shirgah hygrometry station

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]




شکل ۸- همبستگی داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی نیترات در مرحله واسنجی (الف) و مرحله صحت‌سنجی (ب)
Figure 8. The correlation of nitrate simulated data in calibration step (a) and validation step (b)




شکل ۹- متوسط دبی سالانه (الف) و متوسط نیترات محلول سالانه (ب) در زیرحوزه‌های مختلف برای سال ۲۰۰۶
Figure 9. The average of annual discharge (a) and average of annual solution nitrate (b) in various sub-watersheds for year of 2006

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

جدول ۶- دبی و نیترات خروجی از زیرحوزه‌ها

Table 6. The outlet nitrate and discharge from sub-watersheds

| شماره زیرحوزه | متوسط دبی سالانه (متر مکعب بر ثانیه) | متوسط نیترات خروجی سالانه (mg/l) |
|---|---|---|
| ۱ | ۰/۴۷ | ۶۴۰۹/۴۶ |
| ۲ | ۰/۰۲ | ۱۴۵۰/۹۹ |
| ۳ | ۰ | ۲۹/۸۸ |
| ۴ | ۰/۴۴ | ۴۹۵۷/۲۳ |
| ۵ | ۰/۲۶ | ۳۳۶۳/۸۸ |
| ۶ | ۰/۲۷ | ۱۵۱۴/۲۲ |
| ۷ | ۰/۰۲ | ۱۳۵۴/۳۱ |
| ۸ | ۰ | ۶۳۹/۶۴ |
| ۹ | ۰/۲۵ | ۸۸۵/۱۷ |
| ۱۰ | ۰/۱۷ | ۱۴۵/۹۱ |
| ۱۱ | ۰/۰۹ | ۳۱۴۸/۳۲ |
| ۱۲ | ۰/۱۸ | ۲۲۷/۵۲ |
| ۱۳ | ۰/۰۱ | ۴۰/۷۶ |
| ۱۴ | ۰/۱۲ | ۶۱/۷۳ |
| ۱۵ | ۰/۰۲ | ۷/۲۵ |
| ۱۶ | ۰/۰۴ | ۲۰/۰۹ |
| ۱۷ | ۰/۰۲ | ۵/۳۱ |
| ۱۸ | ۰/۱۱ | ۱۳۹/۲۸ |
| ۱۹ | ۰/۰۸ | ۴۳/۹۱ |
| ۲۰ | ۰/۰۶ | ۳۷/۷۸ |
| ۲۱ | ۰ | ۲۶/۱۶ |
| ۲۲ | ۰/۰۵ | ۹۸/۸۵ |
| ۲۳ | ۰/۰۵ | ۷/۱۷ |

به‌طورکلی هدف این تحقیق بررسی کاربرد و کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی، رسوب و نیترات در حوزه آبخیز تالار بود که نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که این مدل می‌تواند ابزار مناسبی در شبیه‌سازی کمیت و کیفیت آب در حوزه آبخیز تالار باشد. استفاده از مدل‌های زمانی- مکانی هم‌چون SWAT توسط ذینفعان، مدیران و سازمان‌های اجرایی امکان بررسی و کمی‌سازی اثرات مختلف فعالیت‌ها و پروژه‌های مدیریتی منابع آب فراهم می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌شود اثر تغییرات اقلیم، پوشش و کاربری اراضی و سناریوهای مختلف مدیریتی بر سیستم هیدرولوژیکی حوزه آبخیز تالار بررسی شود.

## منابع


1. Ababaee, B. and T. Sohrabi. 2011. Evaluate the performance of the SWAT model in Zayandehrud Watershed. Journal of Water Conservation Research, 16: 41-58.
2. Abbaspour, K.C. 2011. User Manual for SWAT-CUP4, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, from http://www.eawag.ch. 100 pp.
3. Abbaspour, K., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang and B. Kløve. 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.
4. Abbaspour, K., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner and R. Srinivasan. 2007. "Spatially- Distributed Modelling of Hydrology and Water Quality in the Prealpine/Alpine Thur Watershed Using SWAT. Journal of Hydrology, 333: 413-430.
5. Ahearn, D., R. Sheibley, R. Dahlgren, M. Anderson, J. Johnson and K. Tate. 2005. Land Use and Land Cover Influence on Water Quality in the Last Free-Flowing River Draining the Western Sierra Nevada, California. Journal of Hydrology, 313: 234-247.
6. Arabi, M., J. Frakenberger, B. Engel and J. Arnold. 2008. Representation of agricultural management practices with SWAT. Hydrological processes, 22: 3042-3055.
7. Arabi, M., R. Govindaraju, M. Hantush and B. Engel. 2006. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of Best Management Practices with SWAT. Journal of the American Water Resources Association, 42: 513-528.
8. Arheimer, B., L. Andersson, J. Alkan-Olsson and A. Jonsson. 2007. Using catchment models for establishment of measure plans according to the WFD. Water Science and Technology, 56: 21-28.


[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

9. Arheimer, B., M. Löwgren, B. Pers and J. Rosberg. 2005. Integrated catchment modelling for nutrient reduction: scenarios showing impacts, potential and cost of measures. Ambio, 34: 513-520.
10. Arnold, J. and P. Allen.1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. Journal of Hydrology, 34: 57-77.
11. Arnold, J., J. Kiniry, R. Rinivasan, J. wiliams, E. Haney and S. Neitsch. 2012. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2012. College Station: Texas Water Resources Institute.
12. Arnold, J., R. Srinivasan, R. Muttiah and J. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. Journal of the American Water Resources Association, 34: 73-89.
13. Bagnold, R. 1977. Bedload transport in natural rivers. Water resourse research, 13: 303-312.
14. Barlund, I., T. Kirkkala, O. Malve and J. Kamari. 2007. Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. Environmental Modelling and Software, 22: 719-724.
15. Behera, S. and R. Panda. 2006. Evaluation of Management Alternatives for an Agricultural Watershed in a Sub-Humid Subtropical Region Using a Physical Process Based Model. Agriculture Ecosystems & Environment, 113: 62-72.
16. Boluwade, A. and C. Madramootoo. 2013. Modeling the Impacts of Spatial Heterogeneity in the Castor Watershed on Runoff, Sediment, and Phosphorus Loss Using SWAT: I. Impacts of Spatial Variability of Soil Properties. Water Air Soil Pollution, 224, 1692.
17. Brown, L. and T. Brown. 1987. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, Report EPA/600/3/87/007, US Environmental Protection Agency, Athens, GA.
18. Cao, W., W. Bowden, T. Davie and A.Fenemor. 2006. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability Hydrological Processes Journal, 20: 1057-1073.
19. Castillo, R., I. Güneralp and B. Güneralp. 2014. Influence of changes in developed land and precipitation on hydrology. Applied Geography, 47: 154-167.
20. Chaplot, V., A. Saleh and D. Jaynes. 2005. Effect of the accuracy of spatial rainfall information on the modelling of water, sediment, and NO3–N loads at the watershed level. Journal of Hydrology, 312: 223-234.
21. Chow, V., D. Maidment and L. Mays. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York. 572 pp.
22. Cibin, R., K.P. Sudheer and I. Chaubey. 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. Hydrological Processes, 24: 1133-1148.
23. Das, S., R. Ruda, B.Gharabaghi, P. Goel, A. Singh and I. Ahmed. 2007. Comparing the Performance of SWAT and AnnAGNPS Model in a Watershed in Ontario. ASABE publishing paper: 701P0207. ASABE, St. Joseph, MI, USA.
24. Davison, P., P. Withers, E. Lord, M. Betson and J. Stromqvist. 2008. PSYCHIC-a processbased model of phosphorus and sediment mobilisation and delivery within agricultural catchments. Part 1: model description and parameterisation. Journal of Hydrology, 350: 290-302.
25. Demissie, A., F. Saathoff, Y. Seleshi and A. Gebissa. 2013. Evaluating the Effectiveness of Best Management Practices in Gilgel Gibe Basin Watershed-Ethiopia. Journal of Civil Engineering and Architecture, 7: 1240-1252.
26. Dillaha, T. and B. Beasley. 1983. Distributed Parameter Modeling of Sediment Movement and Particle Size Distributions. American Society of Agricultural Engineers, 26: 1766-1772.
27. Gassman, P., M. Reyes, C. Green and J. Arnold. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications and future research directions. Transactions of the ASABE, 50: 1211-1250.
28. Hargreaves, G. and Z. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1: 96-99.
29. Hesse, C., K. Krysanova, J. Päzolt and F. Hattermann. 2008. Eco-hydrological modeling in a highly regulated lowland catchment to find measures for improving water quality. Ecological Modelling, 218: 135-148.
30. Hosseini, M., M. Tabatabai, M. Goudarzi and S. Hejazi. 2013. Assessment of current components using SWAT model for estimating runoff future periods affected by climate change. Journal of Climatology, 1: 48-53.
31. Kavian, A., M. Golshan, H. Rouhani and A. Esmaeeli uri.2015. Mazandaran Haraz river basin runoff and sediment load simulation using the model SWAT. Physical Geography Research, 47: 197-211.

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

32. Lam, Q., B. Schmalz and N. Fohrer. 2011. The impact of agricultural Best Management Practices on water quality in a North German lowland catchment. Environ Monit Assess, 183: 351-379.
33. Mohammad, A. and M. Adam.2010. The Impact of Vegetative Cover Type on Runoff and Soil Erosion Under Different Land Uses. Catena, 81: 97-103.
34. Molina-Navarro, E., D. Trolle, S. Martínez-Pérez, A. Sastre-Merln and E. Jeppesen. 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. Journal of Hydrology, 2014: 354-366.
35. Monteith, J. 1965. Evaporation and environment. In: Fogg, G.F. (Ed.), The State and Movement of Water in Living Organisms. Cambridge University Press, Cambridge, pp: 205-234.
36. Moriasi, D., G. Arnold, M. Van Liew, R. Bingner, R. Harmel and T. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50: 885-900.
37. Nash, J. and J. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
38. Nossent, J. 2012. Sensitivity and uncertainty analysis in view of the parameter estimation of a SWAT model of the river Kleine nete, Belgium. PhD thesis. Vrije Universiteit Brussel, 462 pp.
39. Oki, T. and S. Kanae. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. Science, 1068-1072, 313.
40. Pongpetch, N., P. Chandraseka, C. Yossapol, S. Dasananda and T. Kongjun. 2015. Genotoxicity Assessmen the critical Areas And Nonpoint Source Pollution Reduction Best Management Practices in Lam Takong River Basin, Thailand. Environment Asia, 8: 41-52.
41. Priestley, C. and R. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Rev, 100: 81-92.
42. Rode, M., G. Arhonditsis, D. Balin, T. Kebede, V. Krysanova, A. Van Griensven and A. Van Der Zee. 2010. New challenges in integrated water quality modelling. Hydrol. Process, 24: 3447-3461.
43. Sahu, M. and R. Gu. 2009. Modelling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality. Ecological Engineering, 35: 1167-1177.
44. Shao, Y., R. Lunetta, A. Macpherson, J. Luo and G. Chen. 2013. Assessing Sediment Yield for Selected Watersheds in the Laurentian Great Lakes Basin Under Future Agricultural Scenarios. Environmental Management, 51: 59-69.
45. Shrestha, S. and F. Kazama. 2007. Assessment of Surface Water Quality Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study of the Fuji River Basin, Japan. Environmental Modelling & Software, 22: 464-475.
46. Stehler, A., P. Debels and H. Alcayaga. 2008. Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study. Hydrological Sciences Journal, 55: 588-601.
47. Tesfahunegn, G., P. Vlek and L. Tamene. 2013. Application of SWAT model to assess erosion hotspot for sub-catchment management at Mai-Negus catchment in northern Ethiopia. East African Journal of Science and Technology, 2: 97-123.
48. Van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, A. Diluzio and R. Srinivasan. 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of Hydrology, 324: 10-23.
49. Vörösmarty, C., P. McIntyre, M. Gessner, D. Dudgeon, A. Prusevich and P. Green. 2013. Global threats to human water security and river biodiversity. Nature, 467: 555-561.
50. Wang, S., S. Kang, L. Zhang and F. Li. 2008. Modeling hydrological response to different land use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. Hydrological Processes, 22: 2502-2510.
51. Wang, X. and A. Melesse. 2006. Effects of STATSGO and SSURGO as inputs on SWAT model's snowmelt simulation. Journal of the American Water Resources Association, 42: 1217-1236.
52. Williams , J. and H. Berndt. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. American Society of Agricultural Engineers, 20: 1100-1104.
53. Williams, R. 1980. SPNM, a model for predicting sediment phosphorous, and nitrogen from agricultural basins. Water Resources Bulletin, 16: 843-848.
54. Yang, Y. and L. Wang. 2010. review of modelling tools for implementation of the EU water framework directive in handling diffuse water pollution. Water Resources Management, 24: 1819-1843.

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

55. Yuan, Y., R. Bingner and R. Rebich. 2003. Evaluation of AnnAGNPS nitrogen loading an agricultural watershed. Journal of the American Water Resources Association, 39: 457-466.
56. Zahabioun, B., M. Goudarzi and A. Masah Yavani. 2010. Application of SWAT model for estimating runoff in future periods affected by climate change. Journal of Climatology, 3-4, 43-58.
57. Zahedi, E., A. Talebi, S.A. Tabatabaei, A. Raeisi and M. Asiayi. 2016. Subsurface flow simulations to determine potential areas of groundwater dam using SWAT model (Case Study: Doroongar Watershed, Dargaz). Journal of Watershed Management Research, 7: 206-215.
58. Zarif Moazam, M.S., S.H.R. Sadeghi and S.Kh. Mirnia. 2016. Variability of interactions between some soil properties and runoff generation time (Case study: Kojoor watershed). Journal of Watershed Management Research, 7: 1-11.
59. Zhai, X., Y. Zhang, X. Wang, J. Xia and T. Liang. 2012. Non-point source pollution modelling using Soil and Water Assessment Tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China. HYDROLOGICAL PROCESSES, 28: 1627-1640.
60. Zhang, P., Y. Liu, Y. Pan and Z. Yu. 2013. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT model for agricultural non-point source pollution control. Mathematical and Computer Modelling, 588-595.

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]

# Simulation of Discharge and Nitrate in Tallar Basin using SWAT Model

**Maziar Mohammadi[1], Ataollah Kavian[2] and Leila Gholami[3]**

1- Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University
2- Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
(Corresponding Author: a.kavian@sanru.ac.ir)
3- Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University
Received: September 2, 2015 Accepted: November 22, 2015

**Abstract**

In order to controlling and reducing water pollution of surface water and measures to reduce these emissions require environmental programs at watershed scale and also to ensure the cost-effectiveness of such programs, the first stage is determining critical areas that produce polluted runoff. Process-based hydrological models are useful tools for simulating of watershed processes. In this study SWAT model was used for discharge and nitrate simulation in Tallar river Basin. The modeling results calibrated and validated using SWAT-CUP software and then its evaluated using statistical indicators. For Sensitivity analysis of discharge and nitrate used from 25 and 11 parameters respectively, that the curve number (CN) recognized as the most sensitive parameter. The determination coefficient of discharge and nitrate calculated with rates of 0.68 and 0.75, and validation obtained with rates of 0.65 and 0.83, respectively. The NS coefficient for calibration process of discharge and nitrate obtained 0.67 and 0.84, respectively. Also, for validation process were 0.62 and 0.63, respectively. Finally, the discharge and nitrate maps developed for each sub-basins. The results of this study showed that the SWAT model could simulate quality and quantity of Tallar river watershed. Therefore, this model can be used as a useful tool for water resources management and planning in this watershed.

**Keywords:** Calibration, Hydrological model, Validation, Tallar Basin, Water resources management

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-05-15 ]

[ DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45 ]