

## شبیه‌سازی هدررفت عناصر غذایی خاک در حوضه سد قشلاق با استفاده از مدل SWAT

### سپیده شیرزادی<sup>۱</sup> و \*گلانه غفاری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبخیزداری، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران،

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی آبخیزداری، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۴/۳

### چکیده

**سابقه و هدف:** یکی از اثرات بسیار مضر فرآیندهای فرسایشی از دست رفتن مواد غذایی خاک به وسیله رواناب و رسوب ناشی از فرسایش می‌باشد. نیتروژن و فسفر از عناصر غذایی اصلی خاک در حوضه‌های آبخیز هستند، اما انباشتگی این عناصر در آب رودخانه‌ها و آبراهه‌ها یکی از موضوعات مهم در هدررفت عناصر غذایی خاک بوده و می‌تواند منجر به رشد گیاهان آبی، جلبک‌ها و پدیده یوتروفیکاسیون آب‌ها گردد. هدف از این پژوهش شبیه‌سازی میزان فسفر و نیتروژن کل حمل شده توسط رواناب و رسوب در زیرحوضه‌های سد قشلاق، تهیه نقشه مناطق هدررفت عناصر غذایی در سطح حوضه و تعیین زیرحوضه‌های بحرانی با استفاده از مدل SWAT است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش برای شبیه‌سازی بار رسوب و بررسی میزان هدرروی عناصر غذایی خاک، از مدل پیوسته و نیمه‌توزیعی SWAT استفاده شد. بدین منظور ابتدا اقدام به جمع‌آوری نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع، شبکه آبراهه، کاربری و خاک شد. پایگاه داده‌های اقلیم، خصوصیات خاک و مدیریت برای حوضه آبخیز سد قشلاق تهیه شد. پس از اجرای مدل از داده‌های مشاهده‌ای رواناب، رسوب و کیفیت آب سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ برای واسنجی مدل و داده‌های مشاهداتی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ برای اعتبارسنجی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI-2 استفاده گردید.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که مدل SWAT دبی، بار رسوب، فسفر و نیتروژن حوضه سد قشلاق را به خوبی شبیه‌سازی کرده است. به‌عنوان مثال ضرایب  $R^2$ ، NS، r-factor و p-factor برای واسنجی رواناب ماهانه در ایستگاه چهلگزی به ترتیب ۰/۸۰، ۰/۷۲، ۰/۷۸ و ۰/۵۲ و در ایستگاه خلیفه‌ترخان و ۰/۸۲، ۰/۷۴، ۰/۸۰ و ۰/۵۴ برآورد شد. این ضرایب برای فسفر در ایستگاه چهلگزی به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۳، ۰/۳۹ و ۰/۵۵ و در ایستگاه خلیفه‌ترخان ۰/۶۹، ۰/۶۶، ۰/۵۵ و ۰/۴۹ می‌باشد. وضعیت حوضه برای حمل نیتروژن آلی، نترات، فسفر آلی، فسفر محلول و فسفر معدنی به ترتیب ۳۲۳، ۱۲، ۴۸، ۰/۱۸ و ۷۱ کیلوگرم بر هکتار، شبیه‌سازی شد. بیش‌ترین منابع هدررفت عناصر خاک به ترتیب در زیرحوضه‌های شماره ۵۰، ۴۷، ۴۳، ۵۱، ۴۸، ۳۴ و ۳۱ قرار دارند که منشاء حدود ۳۰ درصد هدررفت عناصر خاک در حوضه می‌باشند.

\* مسئول مکاتبه: [ghaffari58@yahoo.com](mailto:ghaffari58@yahoo.com)

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند به‌طور کارآمد برای تعیین زیرحوضه‌های بحرانی از نظر تلفات مواد مغذی فسفر و نیتروژن به‌کار گرفته شود. زیرحوضه‌های دارای کاربری زراعی بر روی اراضی شیب‌دار غرب حوضه، دارای وضعیت بحرانی از نظر هدررفت عناصر غذایی خاک بودند. به‌منظور کنترل هدررفت عناصر غذایی خاک حوضه آبخیز سد قشلاق، عملیات مدیریتی مانند کاهش و کنترل کودهای شیمیایی نترات و فسفات، تبدیل زمین کشاورزی شیب‌دار به مراتع و جنگل‌کاری و در نهایت ایجاد یک منطقه حائل در طول رودخانه توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: فسفر، نیتروژن، هدررفت عناصر غذایی، SWAT, SUFI-2

### مقدمه

بنابر آمار و اطلاعات موجود، قاره آسیا بیش از هر قاره دیگری از مسأله فرسایش خاک رنج می‌برد و در میان کشورهای آسیایی، ایران دارای فرسایش خاک بالایی است (۷). در اثر رسوب‌گذاری و کاهش حجم آبیگری سدهای کشور، سالانه حدود ۲۰ هزار تن از اراضی کشاورزی آبی که واقع در پایین سدها با کمبود آب و کاهش محصول در واحد سطح مواجه هستند (۸). یکی از اثرات بسیار مضر فرآیندهای فرسایشی از دست رفتن مواد غذایی خاک به‌وسیله رواناب و رسوب ناشی از فرسایش می‌باشد (۲۴) و از عناصر مهم موجود در خاک که نقش حیاتی در چرخه گیاه دارد نیتروژن و فسفر می‌باشد. در طول زمان افزایش در میزان جدا شدن مواد غذایی از خاک منجر به تأثیر طولانی مدت بر کیفیت خاک و آب می‌شود (۲۵).

یکی از راه‌های تخمین میزان فرسایش و رسوب و بررسی میزان تلفات مواد غذایی خاک استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی است. مدل‌های فرسایش خاک ابزار جایگزینی برای شبیه‌سازی و مطالعه کوتاه‌مدت و بلندمدت پیامدهای تغییر کاربری اراضی بر سیستم‌های طبیعی است. بدین‌منظور در این پژوهش از مدل نیمه‌توزیعی پیوسته SWAT جهت ارزیابی رواناب، رسوب و هدررفت عناصر خاک استفاده شده است

(۳ و ۱۸). این مدل قابلیت اتصال به سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) را دارا بوده و برای استفاده در شبیه‌سازی رفتارهای هیدرولوژیکی جریان، رسوب و کیفیت آب حوضه‌های پیچیده و با وسعت زیاد بسط یافته است (۱۳ و ۲۰).

مدل SWAT<sup>۱</sup> به‌طور گسترده در جهان و ایران برای تخمین میزان هدررفت نیتروژن و فسفر به‌وسیله رواناب و رسوب مورد استفاده قرار گرفته است. آدیپا و ویلامز (۲۰۱۰) مدل SWAT را جهت تعیین بهترین عملیات مدیریتی در خلیج اینلند در جنوب دلیور ایالات متحده استفاده نمودند. آن‌ها دریافتند که تغییر کاربری کشاورزی به جنگل سبب کاهش محسوسی در تولید و انتقال مواد غذایی به منابع آب در این منطقه خواهد شد (۲). لام و همکاران (۲۰۱۲) جهت ارزیابی نوسانات مکانی و زمانی کیفیت آب در مناطق پست شمال آلمان از مدل SWAT استفاده نمودند. نتایج نشان می‌داد که آب‌های زیرزمینی کم‌عمق عامل اصلی در تجمع بار نترات در رودخانه مورد نظر (۹۳ درصد) است در حالی که رواناب سطحی و جریان جانبی (۷ درصد) نقش کمی داشتند. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که کاربرد SWAT روشی مناسب جهت ارائه راهکارهای مدیریتی برای کنترل مؤثرتر بار نیتروژن در حوضه است (۱۲).

1- Soil and Water Assessment Tool

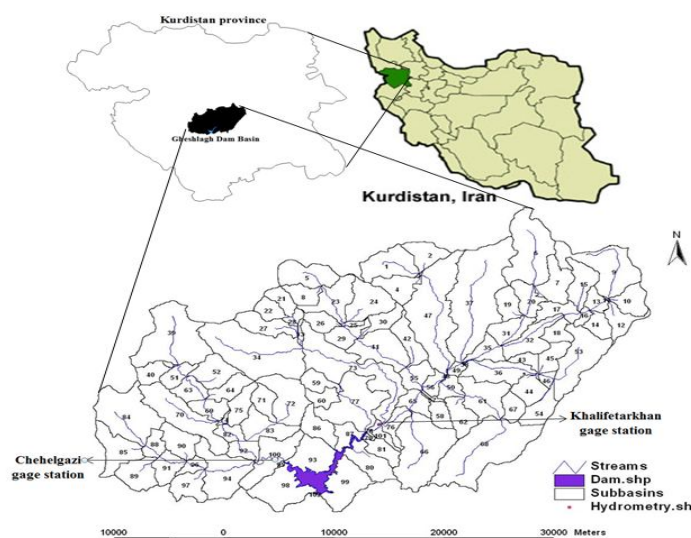
سنندج، بررسی منابع آلودگی غیرنقطه‌ای رودخانه و میزان تلفات مواد غذایی خاک توسط رواناب و رسوب، امری ضروری است. همچنین در این حوضه تاکنون پژوهشی در رابطه با پهنه‌بندی و تهیه نقشه مناطق حساس به هدررفت عناصر غذایی خاک با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کامپیوتری صورت نگرفته است. از این‌رو هدف از این پژوهش شبیه‌سازی میزان فسفر و نیتروژن کل حمل‌شده توسط رواناب و رسوب در زیرحوضه‌های سد قشلاق، تهیه نقشه مناطق هدررفت عناصر غذایی در سطح حوضه و مکان‌یابی زیرحوضه‌های بحرانی با استفاده از مدل SWAT (2012) است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** محل انجام پژوهش در این پژوهش حوضه آبخیز سد قشلاق در استان کردستان می‌باشد که در شمال‌غرب ایران و در فاصله ۱۲ کیلومتری شمال شهر سنندج واقع شده است. این حوضه بین مختصات جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت حوضه آبخیز سد قشلاق منتهی به خروجی سد، ۱۰۶۲/۱۲ کیلومترمربع، شیب متوسط حوضه ۱۶/۷۴ درصد و میانگین وزنی ارتفاع آبخیز ۱۹۵۹/۶۶ متر از سطح دریا می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه حوضه ۴۵۸/۴ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رواناب‌های سطحی این حوضه از طریق دو رودخانه اصلی چهلگزی و خلیفه‌ترخان وارد دریاچه سد قشلاق می‌شود.

نرانگام و تون (۲۰۱۳) مدل SWAT را برای مدل‌سازی تأثیر روش‌های مختلف عملیات کشاورزی و پیامدهای زیست‌محیطی در حوضه بالادست و رودخانه میامی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که رواناب زمین‌های کشاورزی غالباً آلوده به مقادیر زیادی مواد مغذی و باکتری است و از این‌رو برای حذف منابع آلودگی غیرنقطه‌ای از مزارع باید از روش‌های مدیریتی استفاده شود (۱۷). چن و همکاران (۲۰۱۴) از مدل SWAT برای مقایسه اثرات انواع اقدامات مدیریتی بر جابجایی رسوبات و مواد مغذی در یکی از انشعابات اصلی رودخانه ژیانگ‌جیانگ استفاده کردند. نتایج مطالعه نشان داد که مناطق کشاورزی منابع اصلی مواد مغذی و رسوبات در آبخیز بوده و یک نوار فیلتر گیاهی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی آلودگی آب سطحی را کاهش دهد (۶). عمانی و همکاران (۲۰۰۶) مدل SWAT را جهت مدل‌سازی حوضه قره‌سو استفاده نمودند. در این مطالعه که از برنامه SUFI-2<sup>۱</sup> برای واسنجی مدل استفاده شد، نتایج نشان داد که مدل SWAT و SUFI-2، ابزار توانمندی برای شبیه‌سازی اجزاء هیدرولوژیکی و فرسایش در حوضه رودخانه قره‌سو به‌شمار می‌آیند (۲۱). پورعبدالله و تجریشی (۲۰۰۸) با مقایسه مدل SWAT و مدل راسل در منطقه امامه یکی از زیرحوضه‌های حوضه آبخیز سد لتیان بیان کردند که مدل SWAT توانایی بالاتری در تخمین میزان رواناب و رسوب دارد و بیان کردند که هیچ‌یک از اقدامات کوددهی و چرای دام در منطقه تأثیری بر میزان فسفر خروجی از حوضه نداشته است (۲۳).

با توجه به قرار گرفتن حوضه آبخیز سد قشلاق در بالادست سد و اهمیت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سد قشلاق در تأمین نیازهای آبی شهر



شکل ۱- موقعیت مکانی محدوده مورد مطالعه در استان کردستان و ایران.  
**Figure 1. The study area location in Kurdistan province and Iran.**

خاک و شرایط پوشش گیاهی طبیعی خاک با توجه به نقشه اجزاء واحدهای اراضی خاک حوضه تهیه و همین نقشه مبنای تقسیم‌بندی خاک حوضه در GIS قرار گرفت. همچنین جهت دقیق کردن اطلاعات به‌دست آمده پس از تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها، مهم‌ترین پارامترهای خاک‌شناسی که بیش‌ترین تأثیر را بر نتایج پژوهش دارند مشخص و در مرحله واسنجی مدل مقدار بهینه این پارامترها تعیین شدند (شکل ۲).

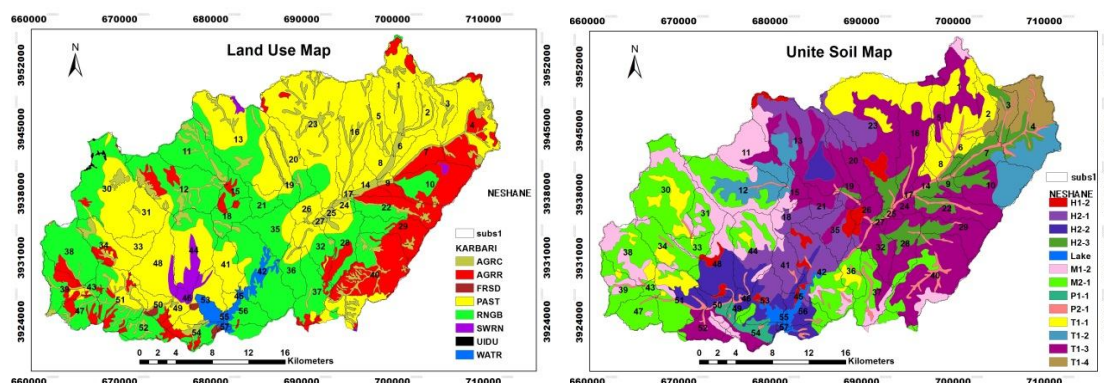
**ب: نقشه کاربری اراضی:** برای تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از نقشه کاربری اراضی رقومی مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور که بر اساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> سال ۲۰۰۴ تهیه گردیده است، به‌عنوان مبنا استفاده گردید و سپس با استفاده از پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی تهیه شده توسط سازمان‌های مختلف، بازدیدهای صحرایی و تصاویر IRS سال ۲۰۰۷ نقشه کاربری اراضی منطقه به روز شد. با توجه به وجود انواع کاربری‌ها و جداول کامل خصوصیات انواع کاربری‌های و پوشش‌های گیاهی (در قالب گیاهان زراعی، مرتعی، علوفه‌ای، درختان میوه و اراضی

لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در مدل SWAT: در این پژوهش ابتدا نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع، شبکه آبراهه، کاربری و خاک تهیه گردید و سپس فایل‌های پایگاه داده‌ای اقلیم، خصوصیات خاک و مدیریت برای حوضه آبخیز سد قشلاق تهیه شد که نحوه تهیه این اطلاعات به قرار زیر است.

**الف: نقشه خاک:** اطلاعات مورد استفاده در مورد خاک‌شناسی این محدوده، از نقشه‌های رقومی خاک‌شناسی مربوط به مرکز تحقیقات خاک و آبخیزداری کشور، نقشه‌ها و گزارش‌های خاک‌شناسی و اجزای واحد اراضی سازمان تحقیقات خاک و آب کشور (۱:۴۰۰۰۰) و تشریح پروفیل‌های شاهد و نتایج آزمایش‌های پروفیل خاک حوضه قشلاق اخذ شده است (۱۶). با توجه به جدول‌های پروفیل خاک حوضه، برخی از پارامترهای خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، تخلخل، درصد سنگ و سنگریزه، درصد شن، رس، سیلت و درصد مواد آلی، کربن آلی، درصد آهک، pH، گروه هیدرولوژیکی خاک، عمق و نوع بافت خاک مشخص گردیدند. همچنین بعضی از شرایط مورفولوژیکی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

کشاورزی دیم (AGRR)، زراعت آبی و باغات (AGRC)، رودخانه‌ها و دریاچه سد (WATR) و اراضی بدون پوشش، مناطق مسکونی و تأسیسات (UIDU) تقسیم گردیدند. در شکل ۲ نقشه کاربری اراضی و اجزاء واحدهای اراضی خاک منطقه پژوهش نمایش داده شده است.

مسکونی) در مدل ArcSWAT، از خصوصیات کاربری‌های مشابه موجود در جداول ArcSWAT جهت معرفی خصوصیات هر کاربری به صورت کدهای چهارحرفی استفاده گردید. به‌طورکلی کاربری‌های اراضی در منطقه مورد مطالعه به هشت گروه شامل مراتع نیمه‌متراکم (PAST)، مراتع فقیر (SWRN)، مراتع متراکم (RNGB)، جنگل دست‌کاشت (FRSD)،



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی و اجزاء واحدهای اراضی خاک در حوضه سد قشلاق.

Figure 2. Map of land use and land units of the soil in Gheslagh dam basin.

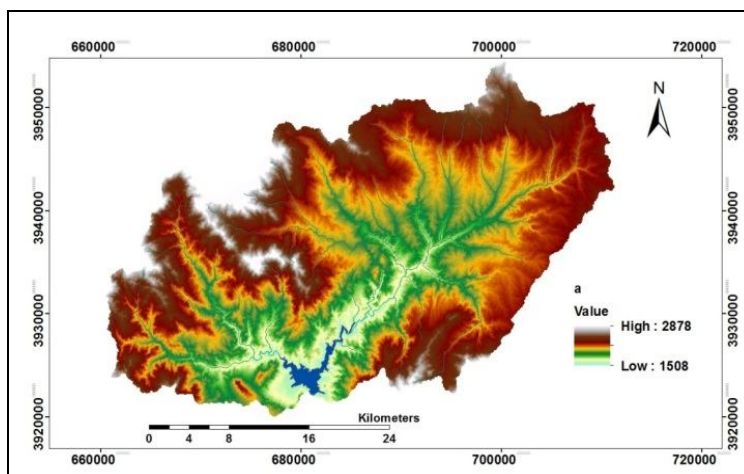
د: مدل رقومی ارتفاع (DEM): جهت تهیه نقشه DEM حوضه از نقشه‌های توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور با قدرت تفکیک ۱۰ متر استفاده گردید. در مدل SWAT از مدل رقومی ارتفاع جهت محاسبات طول، عرض و عمق کانال اصلی جریان آب، شبکه آبراه‌های حوضه و خصوصیات مورفولوژیکی آبخیز مانند مساحت، محیط، طول و غیره استفاده می‌شود (شکل ۳).

ه: داده‌های مدیریتی، کود و آب مصرفی: اطلاعات مربوط به عملیات زراعی (کاشت، برداشت، شخم، کود و آبیاری) در فایل مخصوصی با فرمت (.mgt) وارد شد. این اطلاعات با توجه به جداول مورد نیاز کشت غالب منطقه مطالعاتی که گندم و جو است، برای دوره‌های آبیاری و فصول مختلف به مدل معرفی گردیدند. همچنین جهت اطمینان از صحت عملکرد مدل در تعیین وضعیت سطح ایستابی سفره‌های آب

ج: داده‌های اقلیمی: در این پژوهش از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی داخل و اطراف حوضه شامل ایستگاه‌های سنندج، سقز، بیجار، مریوان و زرینه و ایستگاه‌های باران‌سنجی چهگلگری و خلیفه‌ترخان داخل حوضه، با توجه به دارا بودن طول دوره آماری مشترک مناسب (۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷) استفاده شد. در ایستگاه‌های سینوپتیک، داده‌های دمای کمینه و بیشینه، دمای متوسط روزانه و ماهانه، بارش، فشار هوا، میانگین رطوبت نسبی، رطوبت نسبی بیشینه و کمینه، سرعت و جهت باد، نقطه شبنم، ساعات آفتابی و ابری، رگبارهای ۱۰ دقیقه‌ای، تعداد روزهای غبارآلود مورد استفاده قرار گرفت. ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی (چهگلگری و خلیفه‌ترخان) مورد استفاده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز در این پژوهش از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ دارای آمار می‌باشند.

لازم به ذکر است که مخزن سد قشلاق در پایین دست حوضه و بعد از دو ایستگاه هیدرومتری چهلگزی و خلیفه ترخان قرار گرفته است (شکل ۱) و از این رو در مرحله کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل آب خروجی سد دخالت داده نشد.

زیرزمینی حوضه، اقدام به بررسی منطقه از نظر میزان و محل آبدهی برخی از چاه‌ها و چشمه‌های مهم گردید و آبدهی چشمه‌ها و چاه‌ها در مدل به وسیله افزایش دادن تخلیه سفره آب زیرزمینی (کاهش GWQMN) به صورت جریان پایه در نظر گرفته شد.



شکل ۳- مدل رقومی ارتفاعی حوضه سد قشلاق.

Figure 3. Digital Elevation Model of Ghashlagh dam basin.

رواناب به کانال اصلی منتقل شود. این فرم فسفر به همراه رسوب تجمعی در هر  $HRU^1$  محاسبه می‌باشد و تغییر در میزان رسوب در میزان انتقال این نوع فسفر تأثیرگذار است. میزان فسفر و نیتروژن انتقالی به وسیله رسوب به جریان به وسیله معادله مک‌الروی و همکاران (۱۹۷۶) که توسط ویلیام و هان در سال ۱۹۷۸ اصلاح شد، محاسبه می‌شوند (۱۵). در مرحله شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه با استفاده از مدل SWAT ابتدا کل منطقه به ۵۷ زیر حوضه آبخیز تقسیم و سپس به ۸۶۹ واحد پاسخ هیدرولوژی تقسیم گردید و مدل برای داده‌های سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ به صورت ماهانه اجرا شد. لازم به ذکر است که اگر مدل نتواند رواناب و فرسایش را به درستی شبیه‌سازی نماید، نخواهد توانست هدررفت عناصر غذایی را خوبی شبیه‌سازی نماید (۲۸). در این پژوهش داده‌های

روش شبیه‌سازی رواناب، رسوب و عناصر غذایی خاک در مدل SWAT: در این مدل رابطه اصلی در محاسبه تمام پارامترهای هیدرولوژی در حوضه رابطه بیلان آب حوضه می‌باشد. این رابطه برای شبیه‌سازی مناسب انتقال سموم، رسوبات یا نیتروژن و چرخه هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین روش محاسبه تبخیر و تعرق در این پژوهش روش پریستلی-تیلور می‌باشد (۱۹). در مدل SWAT، فرسایشی که به وسیله بارش و رواناب ایجاد می‌شود از رابطه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش (MUSLE) که توسط ویلیامز ارائه شده است، محاسبه می‌شود (۳۰). فرم‌های اصلی نیتروژن در خاک عبارتند از نیتروژن آلی و معدنی که به وسیله جذب توسط گیاهان، حرکت به وسیله آب، به فرم گازی، دی‌نیتروفیکاسیون و فرسایش از خاک خارج می‌شود. فسفر معدنی و آلی متصل به رسوب ذرات خاک نیز ممکن است به وسیله

1- Hydrological Response Unite

ایستگاه‌ها به‌طور هم‌زمان انجام گیرد (۱). در بخش واسنجی مدل، آمار شبیه‌سازی شده رواناب و رسوب در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ با آمار مشاهده‌ای ایستگاه‌های هیدرومتری و رسوب‌سنجی خلیفه‌ترخان و چهلگزی (در همین سال‌ها) واسنجی گردید. پس از اجرا و واسنجی مدل، از داده‌های مشاهداتی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. در نهایت برای به‌دست آوردن بهترین واسنجی و محدود کردن جواب‌ها به یک جواب واحد، آزمون عدم قطعی مدل با استفاده از توابع مربع خطاها،  $R^2$  و ضریب NS (ضریب نش- ساکلیف<sup>۲</sup>) استفاده شد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$R^2 = \frac{\sum_i^n Q_{obs} \cdot Q_{sim}}{\sqrt{\sum_i^n Q_{obs}^2 \cdot \sum_i^n Q_{sim}^2}} \quad (1)$$

$$NS = 1 - \left[ \frac{\sum_i^n (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs_i} - Q_{avg})^2} \right] \quad (2)$$

که در آن‌ها، n تعداد داده‌ها،  $Q_{sim_i}$  دبی شبیه‌سازی شده،  $Q_{obs_i}$  دبی مشاهده‌ای و  $Q_{avg}$  متوسط دبی مشاهده‌ای در مدت زمان شبیه‌سازی می‌باشد. از دیگر معیارهای مورد استفاده در این مدل برای بررسی عدم قطعیت می‌توان به شاخص‌های I-factor (متوسط عرض باند<sup>۳</sup> ۹۵ ppu) و p-factor (درصد داده‌هایی که در سطح ۹۵ ppu قرار می‌گیرند) اشاره نمود. واسنجی ایده‌آل زمانی حاصل می‌شود که عامل p به سمت ۱۰۰ درصد و عامل I به سمت ۱ میل کند (۱).

### نتایج و بحث

**نتایج آنالیز حساسیت:** مشخصات آماری داده‌های رواناب، بار رسوب، اشکال نیتروژن و فسفر و بار کل فسفر و نیتروژن مشاهده‌ای شامل میانگین، انحراف معیار و ضرایب چولگی و تغییرات، در دو ایستگاه

سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۲ به‌عنوان وارم آپ<sup>۱</sup>، سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۳ برای واسنجی و سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته و دقت شبیه‌سازی مدل بررسی شد. لازم به ذکر است که داده‌های بار رسوب روزانه ایستگاه‌ها فقط در هنگام بارش ثبت شده بود و برای تمام روزهای سال داده مشاهده‌ای وجود نداشت. بنابراین، در این مطالعه به‌منظور برآورد دقیق‌تر بار رسوب ماهانه رودخانه‌ها، از روشی مبتنی بر پایه توسعه منحنی تداوم تغییرات غلظت رسوب از روی داده‌های موجود غلظت رسوب در برخی از روزهای ماه، استفاده شد. در این روش غلظت بار معلق بین دو اندازه‌گیری متوالی، بر اساس نسبت غلظت رسوب به دبی جریان در این دو اندازه‌گیری، بازسازی می‌شود. در نهایت مدل رو برای بازه ماهانه بر اساس این داده‌ها واسنجی شد. بعد از شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه، مقادیر فسفر معدنی و نیتروژن و نترات نیز کالیبره شد. در این پژوهش از داده‌های مشاهده‌ای نیتروژن و فسفر ایستگاه‌های خلیفه‌ترخان و چهلگزی وزارت نیرو که هم‌زمان با برداشت رسوب داده‌های کیفی آب را نیز ثبت می‌کند، استفاده شد. طول دوره آماری این داده‌ها نیز منطبق بر آماری قبلی در نظر گرفته شد. پس از کالیبره کردن مدل و استخراج نقشه‌های نیتروژن و فسفر حوضه، زیرحوضه‌های حساس از نظر هدررفت عناصر غذایی خاک در حوضه سد قشلاق تعیین گردید.

**آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل:** در این مطالعه از برنامه SUFI-2 موجود در نرم‌افزار SWAT-CUP برای پژوهش آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد، زیرا این برنامه به راحتی با SWAT ارتباط برقرار می‌کند، تعداد زیادی از پارامترها را پردازش می‌کند و این امکان را به وجود می‌آورد که واسنجی پارامترها بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در بسیاری از

2- Nash- Sutcliffe  
3- 95 percentage prediction uncertainty

1- Warm up

حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد که استفاده از این روش توسط عمانی و همکاران (۲۰۰۷)، رستمیان و همکاران (۱۳۸۵) و غفاری و همکاران (۲۰۱۰)، جهت آنالیز حساسیت مدل SWAT صورت پذیرفته و مورد تأیید است (۹، ۲۲ و ۲۶).

چهلگزی و خلیفه ترخان، برای سال‌های ۱۹۹۳ الی ۲۰۰۷ به صورت جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به این مشخصات و اشراف بر ویژگی‌های حوضه اقدام به حساسیت‌سنجی پارامترها و واسنجی نمودن مدل گردد. در این پژوهش از مدل SUFI-2 جهت آنالیز

جدول ۱- مشخصات آماری مقادیر مشاهده‌ای رواناب، رسوب، نیتروژن و فسفر در ایستگاه‌های خلیفه ترخان و چهلگزی.

**Table 1. The statistical characters of observed amounts of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus in Khalifetarkhan and Chehelgazi stations.**

ضریب تغییرات (%) C.V.	ضریب چولگی Skewness Coefficient	انحراف معیار Standard deviation	میانگین Average	واحد Unit	نام ایستگاه Station name
8.16	1.23	13.8	21.38	mm	چهلگزی Chehelgazi
22.6	2.48	9.88	13.88		رواناب Runoff
27.4	2.48	9.86	11.48	Ton ha <sup>-1</sup>	چهلگزی Chehelgazi
32.1	1.12	8.98	8.32		رسوب Sediment
10.1	1.08	2.99	17.06	Kg ha <sup>-1</sup>	چهلگزی Chehelgazi
12.3	1.15	3.41	10.57		نیتروژن Nitrogen
15.8	1.14	0.93	6.07	Kg ha <sup>-1</sup>	چهلگزی Chehelgazi
12.9	1.11	3.3	4.8		فسفر Phosphorus

جریان پایه به آبراهه و شماره منحنی (CN)، به ترتیب حساسیت بیش‌تری نسبت به سایر پارامترها دارند که بیش‌تر این پارامترها با پارامترهای حساس به دست آمده در پژوهش‌های قبلی مانند بورای و همکاران (۲۰۰۲) و یانگ و همکاران (۲۰۰۸) همخوانی دارند (۵ و ۳۱). در جدول ۲ مقادیر بهینه محدودده پارامترها که دارای بیش‌ترین حساسیت در مرحله شبیه‌سازی رسوب، نیتروژن و فسفر در حوضه سد قشلاق بودند، نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل حساسیت و واسنجی رواناب با استفاده از مدل SUFI-2 نشان می‌دهد که مدل نسبت به ۲۹ پارامتر حساسیت بیش‌تری دارند که ۱۷ پارامتر مربوط به رواناب، شش پارامتر مربوط به رسوب و شش پارامتر مربوط به شبیه‌سازی نیتروژن و فسفر می‌باشد. در نتیجه برای واسنجی رواناب مدل تنها از این پارامترها استفاده گردید. تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که پارامتر ضریب REVAP، ضریب نفوذ لایه عمیق، فاکتور الفا بازگشت جریان به آبراهه اصلی در بازگشت



جدول ۲- مقادیر بهینه محدوده پارامترها در شبیه‌سازی رواناب، رسوب، نیتروژن و فسفر.

Table 2. The optimum values of the parameters in the simulation of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus.

مقادیر بهینه Best Values	حد پایین Lower limit	حد بالا Upper limit	واحد Unit	توضیح Description	پارامتر Parameter
0.07253	0.06681	0.117788	بی‌بعد	ضریب آب زیرزمینی	V-GW_REVAP.gw
0.094092	0.089138	0.11556	بی‌بعد	ضریب نفوذ لایه عمقی	V-RCHRG_DP.gw
-0.106284	-0.15567	-0.071605	بی‌بعد	شماره منحنی SCS برای رطوبتی متوسط	r_CN2.mgt
0.138173	0.137596	0.183764	روز	فاکتور آلفا بازگشت جریان به آبراهه اصلی	V-ALPHA_BF.gw
4.325014	3.820783	4.48207	میلی‌متر	حداکثر ذخیره تاج پوشش مرتع متوسط	V-CANMX.hru_MIGS
3.72881	3.395924	3.76073	میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد	فاکتور حداکثر ذوب برف در طول سال	V-SMFMX.bsn
-0.132523	-0.14725	-0.129123	میلی‌متر بر ساعت	هدایت هیدرولیکی اشباع در هر لایه خاک	r_SOL_K.sol
0.828658	0.791306	0.845636	بی‌بعد	فاکتور موازنه جذب آب توسط گیاه	V-EPCO.hru
0.420051	3.359011	0.427789	میلی‌متر	آب موجود در هر لایه خاک	r_SOL_AWC.sol
3.786553	3.737988	5.033062	میلی‌متر	حداکثر ذخیره تاج پوشش گیاهان زراعی آبی	V-CANMX.hru_CRIR
11.87471	9.133134	12.137601	روز	زمان تأخیر برای بازگشت آب زیرزمینی	V-GW_DELAY.gw
0.141963	0.139543	0.147961	بی‌بعد	ضریب مانینگ برای کانال اصلی	V-CH_N2
3.72881	3.395924	3.76073	میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد	فاکتور حداقل ذوب برف در طول سال	V-SMFMN.bsn
0.828658	0.791306	0.845636	بی‌بعد	فاکتور موازنه تبخیر آب از خاک	V-ESCO.hru
-1.426886	-1.44367	-1.41244	میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد	دمای آستانه ذوب برف	V-SMTMP.bsn
0.497967	0.343978	0.5758398	بی‌بعد	تنظیم‌کننده اوج رسوب در روندیابی کانال	V-PRF.bsn
0.080906	0.046982	0.008991	بی‌بعد	بیشینه میزان رسوب برگشتی به مسیر کانال	V-SPCON.bsn
0.696884	0.568901	0.713489	بی‌بعد	فاکتور پوشش کانال	r-ch_COV.rte
0.59673	0.546735	0.615031	بی‌بعد	فاکتور ضریب معادله کاربری زمین	V-USIE_P.mgt
0.89503	0.877735	0.91503	بی‌بعد	ضریب فرسایش‌پذیری خاک	r-USIE_K.sol
0.59995	0.589150	0.620558	بی‌بعد	ضریب دسترسی فسفر	V-PSP.bsn
0.48231	0.472312	0.500878	میلی‌گرم	ضریب معدنی شدن فسفر آلی در روز	V-BC4.swq
0.08483	0.82881	0.086571	میلی‌گرم	میزان فسفر آلی رسوبی در روز	V-RS5.swq
1.02343	0.32343	1.544266	میلی‌گرم	غلظت نیتروژن در بارندگی	V-RCN.bsn
2.88782	2.88782	3.921767	بی‌بعد	ضریب غنی‌سازی نیتروژن آلی	V-ERORGN.hru
1.56471	1.56471	1.719364	بی‌بعد	ضریب نفوذ نیتروژن	V-NPERCO.bsn

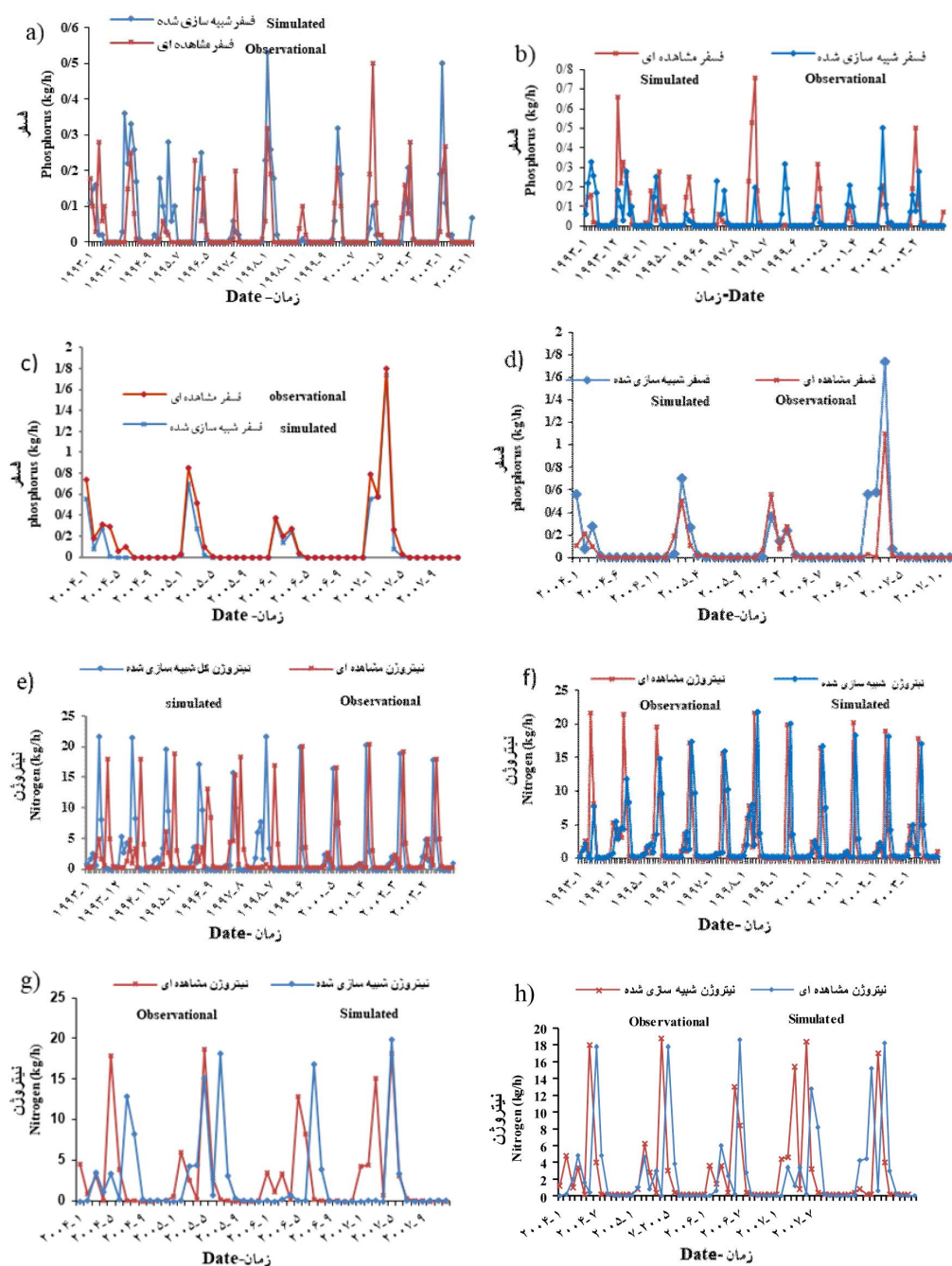
r و v کدهایی هستند که نوع تغییراتی را که برای پارامتر به‌کار برده می‌شود تعیین می‌کنند (v- به این معنی است که مقدار پارامتر با مقدار جدید جایگزین شود و r- یعنی مقدار پارامتر در (مقدار جدید+1) ضرب شود).

واسنجی، اعتبارسنجی و نتایج آزمون عدم قطعیت مدل: نتایج نهایی واسنجی و اعتبارسنجی ماهانه نیتروژن و فسفر برای ایستگاه‌های چهلگزی و خلیفه‌ترخان در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس این ضرایب  $R^2$ ، NS، r-factor و p-factor برای واسنجی رواناب ماهانه در ایستگاه چهلگزی به ترتیب ۰/۸۰، ۰/۷۲، ۰/۷۸ و ۰/۵۲ و در ایستگاه خلیفه‌ترخان و ۰/۷۴، ۰/۷۴، ۰/۸۰ و ۰/۵۴ برآورد شد. در واسنجی رسوب ماهانه ضرایب  $R^2$ ، NS، r-factor و p-factor در ایستگاه چهلگزی به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۰، ۰/۶۳ و ۰/۶۰ و در ایستگاه خلیفه‌ترخان و ۰/۷۱، ۰/۶۹، ۰/۶۰ و ۰/۵۵ برآورد شد (جدول ۳). در این پژوهش از ضرایب  $R^2$  و NS بزرگ‌تر از ۰/۵ به‌عنوان استاندارد قابل قبول بودن شبیه‌سازی‌ها استفاده شد (۷ و ۲۸). به‌طورکلی نتایج نهایی واسنجی و اعتبارسنجی جریان رودخانه روزانه و ماهانه قابل قبول بود و این ضرایب در هر دو ایستگاه هیدرومتری افزایش و مقادیر آن‌ها بهبود یافت که از جمله دلایل آن علاوه بر تعداد کافی و قدمت ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی می‌توان به امکان واسنجی مناسب نتایج با وجود دو ایستگاه هیدرومتری خلیفه‌ترخان و چهلگزی در انتهای دو رودخانه اصلی حوضه اشاره کرد. مقادیر ضرایب  $R^2$ ، NS، r-factor و p-factor در هر دو ایستگاه خلیفه‌ترخان و چهلگزی برای نیتروژن و فسفر در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نیز قابل قبول می‌باشند. همچنین همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مدل در شبیه‌سازی فسفر موفق‌تر از شبیه‌سازی نیتروژن عمل کرده است. این ضرایب برای فسفر در ایستگاه چهلگزی به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۶۳، ۰/۳۹ و ۰/۵۵ و در ایستگاه خلیفه‌ترخان ۰/۶۹، ۰/۶۶، ۰/۵۵ و ۰/۴۹ می‌باشد. حساسیت بالای نیترات موجود در نمونه‌ها نسبت به فسفر و وجود فاصله زمانی در اندازه‌گیری عناصر باعث به وجود آمدن نوعی عدم

قطعیت در داده‌های مشاهداتی نیتروژن شده است که با نتایج بارلند و همکاران (۲۰۰۷) همخوانی دارد (۴). از دیگر دلایل کم بودن دقت شبیه‌سازی نیتروژن نسبت به فسفر می‌توان به عدم قطعیت در داده مشاهداتی طبق نظر بارلند و همکاران (۲۰۰۷) اشاره کرد (۵). وایت و چابی (۲۰۰۵) نیز قابلیت بهتر مدل در شبیه‌سازی فسفر را بیان نموده‌اند. آن‌ها علت این امر شبیه‌سازی بهتر فسفر به همراه رسوب و وجود داده مشاهداتی طولانی‌تر در حوضه تحت بررسی خود بیان نمودند (۲۹). گیکاس و همکاران (۲۰۰۵) مقدار ضریب ناش-ساتکلیف برای شبیه‌سازی روزانه نیتروژن کل و فسفر کل را برابر با ۵۱ تا ۸۷ برای نیتروژن و ۵ تا ۸۲ برای ایستگاه‌های مختلف به‌دست آوردند. بر اساس بررسی آن‌ها استفاده از ایستگاه‌های مختلف و افزایش تعداد سال‌های شبیه‌سازی باعث افزایش دقت شبیه‌سازی می‌شود (۱۱).

طبق بررسی گسمن و همکاران (۲۰۰۷) بیش از ۶۰ درصد پژوهش‌های انجام شده با SWAT در زمینه شبیه‌سازی عناصر نیتروژن و فسفر نشان‌دهنده توانایی خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی نیتروژن و فسفر است (۱۰) که نتایج این مطالعه نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

**نتایج شبیه‌سازی بار نیتروژن و فسفر:** شکل ۵ میزان میانگین هدررفت سالانه فرم‌های مختلف نیتروژن و فسفر را در ۵۷ زیرحوضه سد قشلاق نشان می‌دهد. نتایج تغییرات سالانه نیتروژن و فسفر کل در خروجی حوضه آبخیز سد قشلاق نیز نشان داد که وضعیت حوضه برای مجموع حمل نیتروژن آلی، ۳۲۲/۹۵ کیلوگرم در هکتار، نیترات ۱۲/۳۵ کیلوگرم در هکتار، فسفر آلی ۴۸/۰۴ کیلوگرم در هکتار، فسفر محلول ۰/۱۸ کیلوگرم در هکتار و فسفر معدنی ۷۱/۲۷ کیلوگرم در هکتار بوده است و به‌طورکلی نیتروژن نسبت به فسفر سهم قابل توجه‌تری از هدررفت عناصر خاک را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۵).



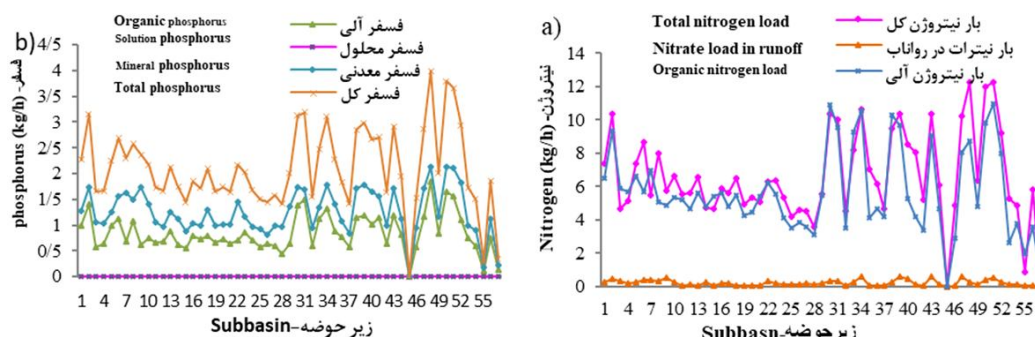
شکل ۴- (a) واسنجی ماهانه فسفر در ایستگاه خلیفه ترخان، (b) واسنجی ماهانه فسفر در ایستگاه چهلگزی، (c) اعتبارسنجی ماهانه فسفر در ایستگاه چهلگزی، (d) اعتبارسنجی ماهانه فسفر در ایستگاه خلیفه ترخان، (e) واسنجی ماهانه نیتروژن در ایستگاه چهلگزی، (f) واسنجی ماهانه نیتروژن در ایستگاه خلیفه ترخان، (g) اعتبارسنجی ماهانه نیتروژن در ایستگاه چهلگزی و (h) اعتبارسنجی ماهانه نیتروژن در ایستگاه خلیفه ترخان.

Figure 4. (a) Phosphorus calibration in Khalifetarkhan station, (b) Phosphorus calibration in Chehelgazi station, (c) Phosphorus validation in Khalifetarkhan station, (d) Phosphorus validation in Chehelgazi station, (e) Nitrogen calibration in Khalifetarkhan station, (f) Nitrogen calibration in Chehelgazi station, (g) Nitrogen validation in Khalifetarkhan station and (h) Nitrogen validation in Chehelgazi station.

جدول ۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی ماهانه رواناب، رسوب، نیتروژن و فسفر برای ایستگاه‌های چهلگزی و خلیفه ترخان.

Table 3. The results of monthly calibration and validation of the runoff, sediment, nitrogen and phosphorus in the Khalifetarkhan and Chehelgazi stations.

اعتبارسنجی Validation				واسنجی Calibration				ایستگاه Station
NS	R <sup>2</sup>	r-factor	p-factor	NS	R <sup>2</sup>	r-factor	p-factor	
0.72	0.80	1.38	0.52	0.72	0.80	0.78	0.52	چهلگزی Chehelgazi
0.74	0.82	0.8	0.54	0.74	0.82	0.8	0.54	رواناب Runoff
0.69	0.69	0.58	0.52	0.69	0.71	0.60	0.55	خلیفه ترخان Khalifetarkhan
0.54	0.59	0.68	0.72	0.70	0.74	0.63	0.60	چهلگزی Chehelgazi
0.60	0.60	0.32	0.50	0.61	0.65	0.19	0.50	رسوب Sediment
0.62	0.63	0.44	0.50	0.60	0.68	0.24	0.56	خلیفه ترخان Khalifetarkhan
0.63	0.66	0.09	0.51	0.63	0.68	0.39	0.55	چهلگزی Chehelgazi
0.60	0.68	0.04	0.48	0.66	0.69	0.55	0.49	فسفر Phosphorus
								خلیفه ترخان Khalifetarkhan

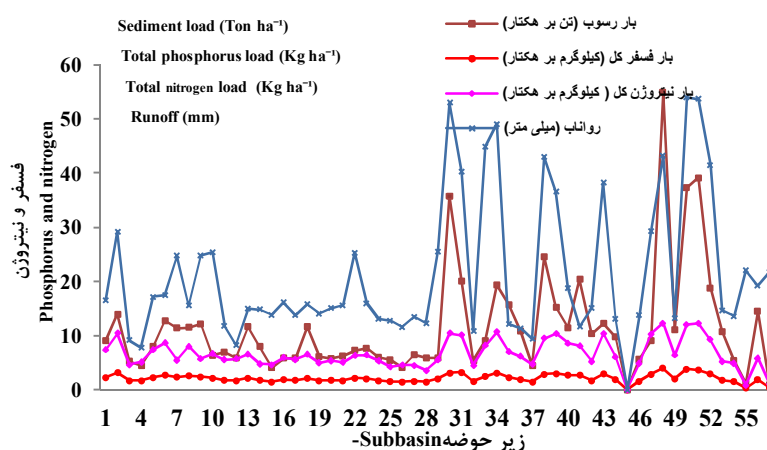


شکل ۵- میانگین هدررفت سالانه فرم‌های نیتروژن (a) و میانگین هدررفت سالانه فرم‌های فسفر در حوضه آبخیز سد قشلاق (b).

Figure 5. The average of annual nitrogen forms losses (a) and the average of annual phosphorus forms losses in Gheshlag Dam basin (b).

فسفر کل به ترتیب ۲۱/۱۳ میلی‌متر، ۱۳/۲۷ تن بر هکتار، ۳۳۵/۳ و ۱۱۹/۵۰ کیلوگرم بر هکتار در کل حوضه می‌باشد و تغییرات حمل فسفر و به خصوص نیتروژن در ارتباط با رواناب و رسوب حمل شده در زیرحوضه‌های می‌باشد (شکل ۶).

به منظور مقایسه مقادیر رواناب، رسوب و مجموع فرم‌های مختلف نیتروژن و فسفر در منطقه در شکل ۶ نمودار میانگین سالانه این مقادیر برای زیرحوضه‌های آبخیز سد در سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷ بعد از اعمال پارامترهای کالیبره شده ارائه شده است. نتایج نشان داد که میانگین سالانه رواناب، رسوب و بار نیتروژن و



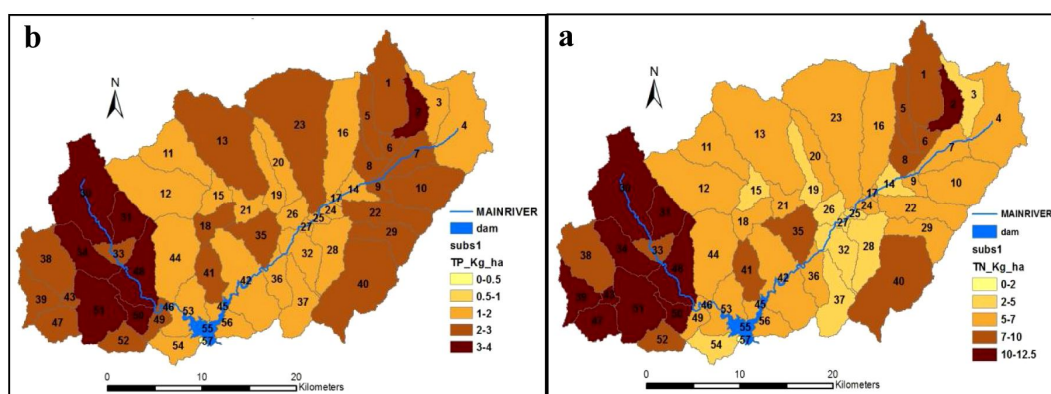
شکل ۶- میانگین سالانه رواناب، بار رسوب، نیتروژن و فسفر کل در زیرحوضه‌ها.

Figure 6. The annual average of runoff, sediment, nitrogen and total phosphorus load of the sub basins.

فسفر بیشتر در سمت غربی حوضه تمرکز یافته‌اند (شکل ۷). میزان هدررفت فسفر آلی و فسفر معدنی در زیرحوضه‌های دارای کاربری مرتعی و زراعت دیم بیشتر می‌باشد، که به‌علت مصرف کودهای فسفات و فرسایش شدید ناشی از عملیات خاکورزی نامناسب به‌صورت شخم در جهت شیب و رواناب بیشتر این زیرحوضه‌ها می‌باشد. هم‌چنان که پژوهش‌های پیشین نیز نشان داده که هرچه میزان فرسایش بیشتر باشد تلفات فسفر در نتیجه آن نیز بیشتر است (۲۴). یوسفی‌فرد (۱۳۸۳) بیان نمود به‌علت این‌که عمده فسفر خاک به فرم آلی می‌باشد با افزایش هدررفت مواد آلی، میزان هدررفت فسفر نیز افزایش می‌یابد (۳۲).

تهیه نقشه هدررفت عناصر غذایی خاک: در شکل ۷ بار نیتروژن و فسفر کل بر اساس متوسط شرایط آب و هوایی طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷، در ۵۷ در زیرحوضه‌های آبخیز سد قشلاق نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود، زیرحوضه‌های ۵۱، ۴۸، ۵۰ و ۳۴ با کاربری غالب مرتع فقیر، مرتع متوسط و زراعت دیم دارای بیش‌ترین میزان هدررفت نیتروژن کل می‌باشند می‌تواند به‌علت بی‌حفاظ بودن سطح خاک در بیش‌تر ماه‌های سال در اراضی زراعی و مرتعی باشد. نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که کشت زود هنگام گندم زمستانه، مقدار نترات در معرض خطر خاک را کم در نتیجه خطر آبیویی آن کاهش پیدا می‌کند (۲۷).

هدررفت فسفر کل در بین زیرحوضه‌ها و کاربری‌های مختلف تفاوت محسوسی نشان داد مشابه نیتروژن، زیرحوضه‌های حساس و تولیدکننده

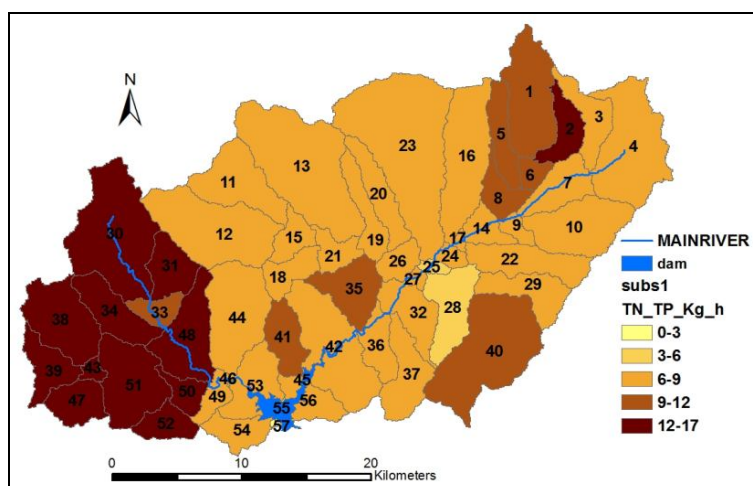


شکل ۷- مقدار کل بار نیتروژن (TN) (کیلوگرم بر هکتار) (a) مقدار کل فسفر (TP) (کیلوگرم بر هکتار) در ۵۷ زیرحوضه سد قشلاق (b).

Figure 7. The total amount of nitrogen (TN) ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) (a) The total amount of phosphorus (TP) ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) in 57 subbasins of Geshlagh dam basin (b).

فرسایش و رسوب زیاد و کاربری غالب مرتع فقیر و متوسط و زراعت دیم می‌باشد. شن و همکاران (۲۰۱۰) به نقل از مسعود و همکاران (۲۰۰۶) نیز بیان می‌دارند که میزان هدرروی نیتروژن و فسفر در مناطق دارای فعالیت انسانی مانند زراعت دیم بالاتر است (۱۴ و ۲۷). همچنین نتایج واندرزاندن و همکاران (۲۰۰۵) نشان می‌دهد که هدررفت عناصر غذایی از زمین‌های کشاورزی و مرتعی بیشتر از کاربری جنگلی است. آن‌ها دلیل این امر را تفاوت خصوصیات هیدرولوژیکی زمین‌های زراعی و مرتعی و فرسایش بیشتر از سطح این اراضی دانستند که تأثیر بسیار زیادی در هدررفت این دو عنصر دارد (۲۸). از این رو با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان نمود که مدل SWAT در شبیه‌سازی حمل نیتروژن و فسفر در حوضه آبخیز سد قشلاق موفق عمل نموده است.

با توجه به این‌که هدف اصلی از این پژوهش بررسی وضعیت هدررفت عناصر غذایی حوضه سد قشلاق می‌باشد، نقشه میزان هدررفت عناصر خاک (مجموع بار نیتروژن و فسفر کل بر حسب کیلوگرم بر هکتار) زیرحوضه‌ها نیز بر اساس متوسط شرایط آب و هوایی طی سال‌های ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۷، در ۵۷ زیرحوضه آبخیز سد قشلاق تهیه شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان هدررفت عناصر مورد مطالعه خاک در غرب حوضه آبخیز و به‌ترتیب در زیرحوضه‌های شماره ۵۰، ۴۷، ۴۳، ۵۱، ۴۸، ۳۴ و ۳۱ قرار دارد و این زیرحوضه‌ها از مجموع ۴۹۴/۷۷ کیلوگرم بر هکتار هدررفت عناصر غذایی خاک در کل حوضه، مقدار ۱۴۸/۴ کیلوگرم بر هکتار را به خود اختصاص داده‌اند و به‌عبارتی منشاء حدود ۳۰ درصد هدررفت عناصر خاک حوضه می‌باشند (شکل ۸) که این مناطق هم‌چنان که قبلاً هم بیان شد دارای



شکل ۸- میزان هدررفت عناصر خاک (مجموع بار نیتروژن و فسفر کل بر حسب کیلوگرم بر هکتار) در ۵۷ زیرحوضه سد قشلاق.

Figure 8. The amount of soil nutrient loss (the sum of nitrogen and phosphorus loss in  $\text{Kg ha}^{-1}$ ) in 57 subbasins of Geshlagh dam basin.

می‌دهد که به‌منظور کنترل هدررفت عناصر غذایی خاک حوضه آبخیز سد قشلاق، بهترین عملیات مدیریتی، کاهش و کنترل کودهای شیمیایی نیتراته و فسفات، تبدیل زمین کشاورزی شیبدار به مراتع و جنگل‌کاری و در نهایت ایجاد یک منطقه حائل در طول رودخانه می‌باشد که به شدت به کاهش هدررفت نیتروژن و فسفر حوضه و ورود به مخزن سد کمک خواهد کرد؛ بنابراین در ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌گردد که با ارائه سناریوهای جدید به مدل در قالب تاریخ‌های متفاوت کوددهی در کنار روش‌های مختلف خاکورزی و آبیاری، آلودگی غیرنقطه‌ای و ضریب غنی‌شدن این عناصر در آب سد قشلاق، نتایج کمی و مستند گردد و این امکان برای مدیران اجرایی و پژوهشگران فراهم شود تا با تحلیل نتایج، بهترین تصمیم را اتخاذ نمایند.

### نتیجه‌گیری کلی

در مطالعه حاضر با استفاده از قابلیت‌های مدل SWAT و داده‌های در دسترس، وضعیت رواناب، رسوب و هدررفت عناصر غذایی خاک (نیتروژن و فسفر) حوضه سد قشلاق در استان کردستان بررسی شد و سپس نقشه مناطق هدررفت عناصر غذایی در سطح حوضه تهیه و زیرحوضه‌های بحرانی مکانیابی گردید. به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که مدل نتایج قابل‌قبولی در شبیه‌سازی رواناب، رسوب و عناصر نیتروژن نیتراته و فسفر معدنی حوضه در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی (با استفاده از مدل SUFI-2) داشته است. همچنین نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند به‌طور کارآمدی برای تعیین زیرحوضه‌های بحرانی از نظر تلفات مواد مغذی فسفر و نیتروژن به‌کار گرفته شود. بررسی اولیه نتایج این پژوهش نشان

### منابع

1. Abbaspour, K.C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., and Klove, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.* 524: 733-752.
2. Aditya, S., and Williams, FR. 2010. Evaluation of best management practices in Millsboro pond watershed using soil and water assessment tool (SWAT) model. *J. Water Resour. Prot. (JWARP)* 2: 403-412.



3. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34: 1. 73-89.
4. Bärlund, I., Kirkkala, T., Malve, O., and Kämäri, J. 2007. Assessing the SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment. *Environ. Model Sof.* 22: 5. 719-724.
5. Bouraoui, F., Galbiati, L., and Bidoglio, G. 2002. Climate change impacts on nutrient loads in the Yorkshire Ouse catchment (UK). *Hydr. Earth Sys. Sci.* 6: 2. 197- 209.
6. Chen, Y., Shuai, J., Zhang, Z.H., Shi, P., and Tao, F. 2014. Simulating the impact of watershed management for surface water quality protection: A case study on reducing inorganic nitrogen load at a watershed scale. *Eco. Engi.* 62: 61-70.
7. Cheng, H., Ouyang, W., Hao, F., Ren, X., and Yang, S. 2006. The nonpoint source pollution in livestock breeding areas of the Heihe River basin in Yellow River. *Stoch. Environ. Res. Risk Asses.* 21: 3. 213-22.
8. Dregne, H.E. 1992. Erosion and soil productivity in Asia. *J. Soil Water Cons.* 47: 8-13.
9. Etaraf, H. 2000. Effects of the operation of loess soil land on fertility and soil erosion of Maravetappe, M.Sc. Thesis, Department of Rangeland and Watershed Management. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 121p. (In Persian)
10. Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., and Ahmadi, H. 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydro. Proc.* 24: 7. 892-903.
11. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., and Arnold, J.G. 2007. The soil and water assessment tool: Historical development, applications and future research directions. *T. ASABE.* 50: 4. 1211-1250.
12. Gikas, G.D., Yiannakopoulou, T., and Tsihrintzis, VA. 2005. Modeling of nonpoint source pollution in a Mediterranean drainage basin. *Environ. Model. Assess.* 11: 3. 219-233.
13. Lam, Q.D., Schmaltz, B., and Fohrer, N. 2012. Assessing the spatial and temporal variations of water quality in lowland areas, northern Germany. *J. Hydrol.* 438-439: 137-147.
14. Lenhart, T., Fohrer, N., and Frede, H.G. 2003. Effects of land use changes on the nutrient balance in mesoscale catchments. *Phy. Chem. Earth.* 27: 9-10. 645-654.
15. Massoud, M.A., El-Fadel, M., Scrimshaw, M.D., and Lester, J.N. 2006. Factors influencing development of management strategies for the Abou Ali River in Lebanon-I: spatial variation and land use. *Sci. Total Environ.* 362: 15-30.
16. McElroy, A.D., and Chiu, S.Y. 1976. Loading function for assessment of water pollution from nonpoint sources. *Environ. Prot. Age.* 12: 76-151.
17. Mhajy-Ashjae, M.H. 1984. The principles of land evaluation. Ministry of Agriculture, Department of Agricultural Research & Education, Soil and Water Research Institute. Publication 655, Tehran. 87p. (In Persian)
18. Naramngam, S., and Tony, S.T.Y. 2013. Environmental and economic implications of various conservative Agricultural practices in the little Miami River basin. *Agri. Water Mon.* 119: 65-79.
19. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. 2013. SWAT user manual, version 2012. Texas Water Resources Institute Technical Report. A & M University. Texas. USA. 340p.
20. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. 2002. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation-Version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service and Black land Research Center. Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. 245p.



21. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. 2011. SWAT user manual, version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report. A & M University. Texas, USA. 340p.
22. Omani, N. 2006. Modeling the estimation of sediment potential input to reservoir by using of satellite imaging and SWAT model. M.Sc. Thesis of Sharif University. 130p. (In Persian)
23. Omani, N., Tajrishi, M., and Abrishami, A. 2007. Simulation the flow of rivers using the SWAT model and GIS. Seventh International of River Engineering. University of Chamran, Ahvaz. 8p. (In Persian)
24. Pourabdollah, M., and Tajrishi, M. 2008. Modeling the erosion of catchment by RUSLE and SWAT models. Seventh International Conference of Civil engineering. 11p. (In Persian)
25. Ramos, M.C., Martí nez-Casasnovas, J.A. 2006. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penede's region (NE Spain). *Agric. Ecosyst. Environ.* 113: 356-363.
26. Rihanitabar, E. 2006. Nitrate, agriculture and environment transportation. Tabriz University Press. 156p. (In Persian)
27. Rostamian, R. 2006. Estimation of runoff and sediment in Beheshtabad in Northern Karun Using SWAT 2000, MA thesis of soil science. Faculty of Agriculture, University of Isfahan. 134p. (In Persian)
28. Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L.M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37: 5. 1169-1188.
29. Shen, Z., Hong, Q., Yu, H., and Niu, J. 2010. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types. *Sci. Total Environ.* 408: 8. 1971-1978.
30. Vander Zanden, M.J., Vadeboncoeur, Y., Diebel, M.W., and Jeppesen, E. 2005. Primary consumer stable nitrogen isotones as indicators of nutrient source. *Environ. Sci. Technol.* 39: 7509-15.
31. White, K.L., and Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *J. Amer. Water Resour. Assoc.* 41: 5. 1077-1089.
32. Williams, J.R. 1975. Sediment-Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. P 244-252. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources*, US Department of Agriculture, Agriculture Research Service, Washington DC.
33. Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., and Yang, H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for aSWAT application to Chaohe Basin in China. *J. Hydrol.* 358: 1-23.
34. Yousefifard, M., Khademi, H., and Jalalian, A. 2007. Soil degradation through land use changes of rangeland in Cheshme Ali area of Charmahal and Bakhtiari province. *J. Agri. Sci. Natur. Resour.* 14: 1. 1-10. (In Persian)



---

## The Soil Nutrient Loss Simulation in Gheshlagh Dam Basin Using SWAT Model

S. Shirzadi<sup>1</sup> and \*G. Ghaffari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Watershed Management Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran, <sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Watershed Management Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

Received: 11.07.2016; Accepted: 06.24.2018

---

### Abstract

**Background and Objectives:** One of the harmful effects of erosion processes is soil nutrient loss by runoff and sediment. Nitrogen and phosphorus are the main nutrients of soil in watersheds, but the accumulation of these elements in rivers and channels is the one of the most important issues in the nutrient soil loss, that can lead to the growth of aquatic plants, algae and led to Eutrophication phenomena. The aim of this study is to simulate the amount of total phosphorus and nitrogen that carried by runoff and sediment in the sub-basins of the Gheshlagh dam basin, mapping of nutrient loss in the basin and determining the critical sub-basins using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model.

**Materials and Methods:** To simulate the sediment load and the amount of soil nutrients loss, continuous and semi-distributed SWAT model was used. For this purpose, at first the DEM, network of streams, land use and soil maps were collected. The climate, soil and management databases were prepared for Gheshlagh dam basin. The observation data of runoff, sediment and water quality of 1993 to 2003 years were used for model calibration and those for 2004 to 2007 years were used for model validation using the SUFI-2 algorithm.

**Results:** The results showed that the SWAT model has simulated discharge, sediment, phosphorus and nitrogen in Gheshlagh dam basin very well. For example, the  $R^2$ , NS, r-factor and p-factor coefficients for monthly runoff calibration in Chehelgazi station were estimated 0.80, 0.72, 0.78 and 0.52 respectively and in Khalyfetarkhan station 0.82, 0.74, 0.80 and 0.54. The coefficients for phosphorus in Chehelgazi station are 0.68, 0.63, 0.39 and 0.55 respectively and in Khalyfetarkhan station 0.69, 0.66, 0.55 and 0.49. The organic nitrogen, nitrate, organic phosphorus, soluble phosphorus and mineral phosphorus were estimated to be 323, 12, 48, 0.18 and 71 kg per hectare, respectively. The sub-basins with highest sources of soil loss are 50, 47, 43, 51, 48, 34 and 31 sub-basins, respectively, which are the source of about 30 percent of total nitrogen and phosphorus load in the basin.

**Conclusion:** The results showed that the model can be effectively applied to determine the critical sub-basins with regard to nitrogen and phosphorus loss. The cultivated lands on steep slopes in west of basin have critical situation in terms of soil nutrient loss. In order to control soil nutrient loss of Gheshlagh dam watershed, the best management practices are reduction and control of nitrate and phosphate fertilizers, conversion of agricultural land to rangeland or forest in slopes and also creating a buffer zone along the river to reduce nitrogen and phosphorus losses entering to the reservoir basin.

**Keywords:** Nitrogen, Nutrient Loss, Phosphorus, SUFI-2, SWAT

---

\* Corresponding Author; Email: [ghaffari58@yahoo.com](mailto:ghaffari58@yahoo.com)