

## بررسی دقت شبیه‌سازی شوری با استفاده از چرخه فلزات سنگین و نیتروژن در مدل SWAT (مطالعه

### موردی: حوضه آبریز ناورود)

کبری شیخی گراکویی<sup>۱</sup>، مریم نوابیان<sup>۲</sup>، مجید وظیفه دوست<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی

دریای خزر دانشگاه گیلان

۳. استادیار، گروه مهندسی آب دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان و عضو وابسته پژوهشی پژوهشکده حوضه آبی

دریای خزر دانشگاه گیلان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۵/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۶/۴)

## چکیده

فعالیت‌های بشر در دهه‌های گذشته به طور چشمگیری کیفیت منابع آب را تغییر داده است به طوری که منابع آب یا در معرض آلودگی قرار گرفته‌اند و یا این‌که آلوده شده‌اند. در این میان بخش کشاورزی سهم به‌سزایی در افزایش شوری، کاهش کیفیت و افزایش مصرف آب سطحی دارد. مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب در مقیاس حوضه مانند مدل SWAT ابزار توانمندی برای شبیه‌سازی اثر آلاینده‌های نامتمرکز مانند فعالیت‌های کشاورزی بر روی کیفیت و کمیت منابع آب هستند. از آنجا که شوری یکی از مهم‌ترین مولفه‌های کیفی منابع آب محسوب می‌شود و تحت تاثیر عملیات آبیاری، زهکشی و اعمال کود قرار دارد، در پژوهش حاضر از مدل SWAT برای شبیه‌سازی بار شوری حاصل از کشت برنج در اراضی شالیزاری و ورود املاح آن به رودخانه تحت دو چرخه فلزات سنگین و نیتروژن در حوضه آبریز ناورود (حوضه معرف غرب استان گیلان)، استفاده و دقت مدل در شبیه‌سازی شوری به دو روش مذکور مقایسه شد. مدل SWAT برای دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۰۶ با داده‌های دبی و بار شوری رودخانه واسنجی و اعتبارسنجی گردید. برای بررسی کارایی مدل از دو شاخص آماری  $R^2$  و NS استفاده گردید. مقادیر این دو شاخص در شبیه‌سازی دبی رودخانه ناورود به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۵۸ و در شبیه‌سازی بار شوری تحت چرخه فلزات سنگین ۰/۳۰ و ۰/۷۱- و تحت چرخه نیتروژن به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۵۴ به دست آمد. بنابراین استفاده از چرخه نیتروژن در شبیه‌سازی بار شوری حوضه آبریز ناورود توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب سطحی، اراضی شالیزاری، انتقال املاح.

## مقدمه

استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد محصول کشاورزی، منجر به آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی و کاهش کیفیت آن می‌شود. در طول چند دهه گذشته، با وجود تلاش‌های بسیار، کیفیت منابع آب بهبود قابل توجهی نیافته است. این عدم بهبود توسط بسیاری از محققان به نقش منابع آلودگی غیرمتمرکز، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی نسبت داده شده است (Oeurng et al., 2011; Prasuhn and Sieber, 2005). به‌ویژه رواناب حاصل از زمین‌های کشاورزی که همواره غنی از رسوبات، مواد مغذی و آفت‌کش‌ها است. با توجه به روند رو به کاهش کمیت منابع آب و به دنبال آن افزایش آلودگی این منابع، تعیین سهم آلاینده‌گی

بخش کشاورزی در برنامه‌ریزی منابع آب و اتخاذ راهکاری مناسب جهت کنترل آلودگی، اهمیت بالایی دارد. یکی از مهم‌ترین روش‌های استفاده بهینه و کنترل آلاینده‌های کشاورزی منابع آب و خاک، مدیریت صحیح حوضه‌های آبریز می‌باشد. دست اندرکاران و محققان آب و آبیاری راه‌حل‌های مختلفی نظیر فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری عرضه کرده‌اند اما عقیده بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیک در حوضه‌های آبریز می‌تواند راه حل بهینه و مناسب‌تری در خصوص مدیریت منابع آب ارائه دهد. در میان مدل‌های شبیه‌ساز حوضه، مدل<sup>۱</sup> SWAT، یک مدل توسعه یافته در مقیاس حوضه و بر اساس مفاهیم فیزیکی و توزیع پیوسته است. این مدل برای بررسی اثر مدیریت نهاده‌های بخش

استفاده نمودند. در این پژوهش شاخص‌های آماری  $R^2$  و NS به ترتیب برابر ۰/۵۴ و ۰/۶۱ گزارش شد.

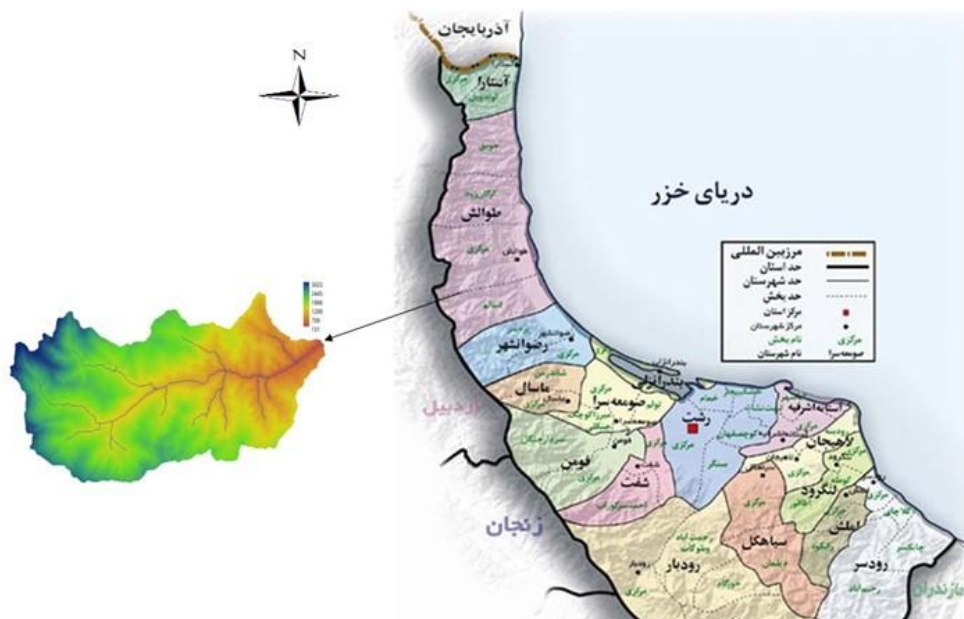
Akhbari *et al.* (2013) اقدام به ارزیابی مدل SWAT در زمینه شبیه‌سازی شوری در یکی از رودخانه‌های ایالت کالیفرنیا آمریکا نمودند. در این مطالعه که تنها مطالعه در بررسی شوری با استفاده از مدل تا سال ۲۰۱۳ بوده است، برای شبیه‌سازی شوری آب رودخانه از چرخه انتقال و شبیه‌سازی فلزات سنگین استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی دبی توسط مدل در دو منطقه مختلف از حوضه ارزیابی شد که مقادیر  $R^2$  و NS برای منطقه اول به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۰ و در منطقه دوم به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۸۸ بودند. با توجه به این مقادیر، عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی کاملاً رضایت بخش بود. همچنین مدل توانست با  $R^2$  و NS ۰/۸۴ و ۱/۲۷- شوری را شبیه‌سازی نماید. از آنجا که حوضه آبریز ناورود حوضه معرف در ناحیه غرب استان گیلان است و وضعیت فعالیت‌های کشاورزی در سطح این حوضه بر کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی این حوضه تأثیرگذار است، هدف از این پژوهش ارزیابی دقت شبیه‌سازی شوری با استفاده از مدل SWAT در رودخانه اصلی حوضه آبریز ناورود (رودخانه ناورود) در نظر گرفته شد. همچنین برای نخستین بار شوری در مدل SWAT تحت شرایط حاکم بر چرخه نیتروژن شبیه‌سازی و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی شوری تحت شرایط حاکم بر چرخه فلزات سنگین مقایسه شد.

### مواد و روش‌ها

**معرفی حوضه:** حوضه آبریز ناورود در محدوده شهرستان تالش بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار دارد. شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز ناورود را نشان می‌دهد. مساحت این حوضه ۴۶۱/۰۱ کیلومتر مربع و محیط آن ۱۳۱/۳ کیلومتر می‌باشد. رودخانه ناورود به عنوان مهم‌ترین رودخانه حوضه آبریز ناورود از یک شاخه اصلی و ده شاخه فرعی به نام‌های کوره‌رود، بیلی، سوکله روبر، بیزه‌سی، دشت نساء، شالو، سوئین‌سر، لاکاتشون، دجواش و وکش تشکیل شده است که از دامنه‌های شرقی سلسله جبال البرز و کوه‌های حجاب، سلطه‌خونی، اسبه‌ریسه، هفته‌خونی و بوغرداغ با ارتفاعات بالای ۲۸۰۰ متری جریان یافته، و در جهت غرب به شرق به مسیر خود ادامه داده و پس از عبور از روستاهای خرگیل و اسالم و طی ۴۴ کیلومتر دیگر به دریای خزر می‌پیوندد. انشعابات رودخانه ناورود برای آبیاری مزارع برنج منطقه به وسعت ۲۰۰۰ هکتار که کشت غالب مردم منطقه است، استفاده می‌گردد.

کشاورزی (شامل نحوه کاشت، کوددهی، آبیاری و زهکشی) و خصوصیات توزیع مکانی (مخازن و استخرها) در مناطق آبیاری توسعه یافته است.

Akbari *et al.* (2004) به بررسی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی روزانه حوضه آبریز چهل چای، به عنوان یک آبریز در شرایط محیطی و اقلیمی شمال ایران، پرداختند. شاخص‌های آماری در نظر گرفته شده در این مطالعه  $R^2$  و ENS بود که مقدار هر کدام به ترتیب برابر با ۰/۶۲ و ۰/۵۷ به دست آمد. نتایج این بررسی نشان دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی دبی روزانه رودخانه بود. Galvan *et al.* (2009) به بررسی کارایی مدل SWAT جهت تخمین بار آلودگی انتقالی در رودخانه مکا در اسپانیا که تحت تأثیر زهاب اسیدی حاصل از فعالیت معادن در منطقه بود، پرداختند. به دلیل کمبود داده‌های دبی رودخانه، رفتار هیدرولوژیکی حوضه رودخانه مکا با استفاده از مدل SWAT شبیه‌سازی گردید. مدل برای دوره آماری (۱۹۹۹-۱۹۸۲) و (۲۰۰۲-۲۰۰۰) با گام زمانی روزانه به ترتیب مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت. ضریب همبستگی پیرسون ( $R$ ) و شاخص NS گزارش شده برای دبی رودخانه به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۰/۸۳ بود که موفقیت مدل در شبیه‌سازی دبی رودخانه مکا را نشان می‌دهد. آن‌ها گزارش کردند که مدل SWAT در شرایط کم‌آبی رودخانه با دقت کم‌تری شبیه‌سازی را انجام داده است و این به دلیل دقت پایین داده‌های ورودی اندازه‌گیری شده در این شرایط بود. Akhavan *et al.* (2010) آبتیوی نیترات در حوضه بهار همدان را با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از برنامه SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای داده‌های روزانه دبی و نیترات در خروجی حوضه انجام شد. مقادیر گزارش شده  $R^2$  و NS در دوره واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۸۳ و ۰/۷۷ و برای دوره اعتبارسنجی برابر با ۰/۷۰ و ۰/۷۰ بود که نشان‌دهنده موفقیت مدل در شبیه‌سازی و کاربرد مدل در حوضه می‌باشد. Golmohammadi *et al.* (2013) با استفاده از مدل SWAT به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت منابع آب در حوضه کریک در کشور کانادا پرداختند. آن‌ها با ترکیب مدل SWAT و DRAINMOD که یکی در مقیاس حوضه و دیگری در مقیاس مزرعه می‌باشد، اقدام به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه با گام زمانی ماهانه برای دبی و نیترات نمودند. شاخص آماری  $R^2$  در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۷۶ گزارش شد که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل SWAT در شبیه‌سازی است. Chen *et al.* (2014) از مدل SWAT برای مقایسه اثر روش‌های متفاوت مدیریت حوضه بر مقدار انتقال رسوب و مواد مغذی در آب سطحی،



شکل ۱ - موقعیت حوزه آبریز ناورود

اساس این چرخه در مدل SWAT، بر معادله بیلان آب استوار است. یکی دیگر از قابلیت‌های بسیار مهم مدل SWAT شبیه‌سازی چرخه نیتروژن می‌باشد. نیتروژن در آب و خاک بسیار واکنش‌پذیر و پویا است. نیتروژن ممکن است به صورت کود شیمیایی، کود و فضولات حیوانی، تثبیت از اتمسفر توسط باکتری و باران به خاک وارد شود. نیتروژن از طریق جذب توسط گیاه، فرسایش خاک، آبشویی، عمل تصعید و فرآیند نیترات‌زدایی می‌تواند از خاک خارج شود. در مدل SWAT پنج فرم برای نیتروژن خاک در نظر گرفته می‌شود. دو حالت برای فرم‌های غیرآلی نیتروژن و سه حالت دیگر برای فرم نیتروژن آلی است. یکی از فرم‌های نیتروژن در خاک نیترات می‌باشد که می‌تواند از طریق رواناب سطحی، جریان جانبی و نفوذ عمقی انتقال پیدا کند. در مدل مقدار نیتراتی که توسط آب جابه‌جا می‌شود از حاصل جمع غلظت نیتروژن در آب‌های جاری با حجم آبی که از هر مسیر عبور می‌کند، محاسبه می‌گردد که معادله آن در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$\text{Conc}_{\text{NO}_3} = \frac{\text{NO}_{31y}(1-\exp[-W_{\text{mobile}}/(1-\theta_e)\text{SAT}_{1y}])}{W_{\text{mobile}}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه،  $\text{Conc}_{\text{NO}_3}$  غلظت نیترات در آب جاری برای هر لایه بر حسب  $(\text{Kg N}/\text{mmH}_2\text{O})$ ،  $\text{NO}_{31y}$  غلظت نیترات در هر لایه خاک  $(\text{Kg N}/\text{ha})$ ،  $W_{\text{mobile}}$  حجم آب که توسط رواناب سطحی، نفوذ عمقی یا جریان جانبی از لایه مورد نظر خارج می‌شود  $(\text{mmH}_2\text{O})$ ،  $\theta_e$  کسری از تخلخل که آنیون‌ها به آن وارد نمی‌شوند و  $\text{SAT}_{1y}$  رطوبت اشباع لایه خاک می‌باشد  $(\text{mmH}_2\text{O})$ .

### معرفی مدل SWAT : مدل SWAT، یک مدل

هیدرولوژیکی با گام زمانی پیوسته بر اساس مفاهیم فیزیکی است. این مدل ابزار توانمندی برای پیش‌بینی اثر مدیریت اراضی بر منابع آب، رسوب و انتقال مواد شیمیایی کشاورزی در حوزه‌هایی با انواع بافت خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریت مختلف می‌باشد (Arnold et al., 2007). مدل SWAT بر اساس مفهوم واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) طراحی شده است به طوری که هر زیرحوضه در مدل به تعدادی HRU تقسیم می‌شود که دارای ویژگی‌های کاربری زمین، مدیریت و خاک منحصر به فرد می‌باشد. بار مواد مغذی، رسوب و رواناب از هر زیرحوضه به طور جداگانه محاسبه و پس از آن برای تعیین بار کلی با هم جمع می‌گردد. بنابراین مدل SWAT می‌تواند برای یک حوضه بزرگ کشاورزی با صدها زیرحوضه کوچک بکار گرفته شود. مدل SWAT همچنین می‌تواند با استفاده از سیستم داده‌های جغرافیایی (GIS)، اطلاعات کاربری اراضی، پوشش گیاهی، مدل رقمی ارتفاعی، مشخصات خاک، شیب، زهکشی و مرز حوضه را به صورت لایه‌های رستری دریافت نموده و گزینه‌های مختلف مدیریت کمی و کیفی منابع آب را شبیه‌سازی کند (Tripathi et al., 2004). برای پیش‌بینی دقیق جابه‌جایی آفت‌کش‌ها، رسوبات و مواد مغذی، چرخه هیدرولوژیکی که توسط مدل شبیه‌سازی می‌گردد، باید با آن چه که در واقعیت وجود دارد، هم‌خوانی داشته باشد. بنابراین

حوضه، نقشه‌های کاربری اراضی و خاک، آمار و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی، اطلاعات کمی و کیفی رودخانه، شیوه مدیریت نهاده‌های کشاورزی شامل آبیاری، زهکشی، کوددهی، شخم و کشت اراضی کشاورزی است که در جدول (۱) مقادیر برخی پارامترها ارائه شده است. در این پژوهش برای حوضه آبریز ناورود، اطلاعات فوق از شرکت سهامی آب منطقه‌ای گیلان (نقشه‌ها و داده‌های ایستگاه‌های آبسنجی و هیدرومتری) و سازمان امور آب غرب گیلان جمع‌آوری شد.

**نقشه بافت خاک:** با توجه به نقشه خاک موجود از منطقه، هفت کلاس بافت خاک در سطح حوضه شناسایی شد که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) آورده شده است. در هر کلاس بافت خاک، خصوصیات خاک شامل تعداد لایه خاک، جرم مخصوص ظاهری، آب قابل دسترس، نسبت کربن به نیتروژن، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، درصد ذرات خاک می‌بایست مشخص شود. این نقشه به عنوان داده پایه وارد مدل شد.

چرخه دیگری که مدل SWAT قابلیت بررسی و شبیه‌سازی فرآیندهای حاکم بر آن را دارد، چرخه انتقال فلزات سنگین می‌باشد. در مدل SWAT این امکان وجود دارد که بار حاصل از فلزات سنگین به صورت یک منبع نقطه‌ای در کل سیستم رودخانه به مدل وارد شود و مدل بار این فلزات را از طریق شبکه کانال‌ها مسیریابی کند. با این حال باید توجه داشت که این مسیریابی شامل الگوریتم برای مدل‌سازی فرآیندهایی که در داخل جریان رخ می‌دهد، نمی‌باشد. در واقع در مدل‌سازی بار حاصل از فلزات سنگین تنها چگونگی انتقال این عناصر در مدل SWAT، که از معادله بقای جرم تبعیت می‌کند، در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش به دلیل عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی مستقیم شوری، به منظور بررسی بار شوری رودخانه ناورود از دو چرخه نیتروژن و فلزات سنگین استفاده شد تا دقت دو چرخه در شبیه‌سازی با هم مقایسه گردد.

**اطلاعات مورد نیاز مدل SWAT:** این اطلاعات شامل لایه‌های رقومی ارتفاعی، نقشه توپوگرافی و شبکه آبراهه‌های

جدول ۱- برخی اطلاعات مورد نیاز مدل SWAT

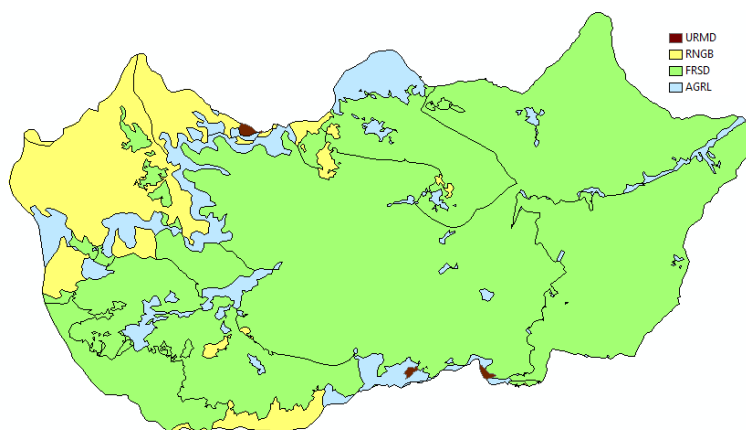
| نام پارامتر                 | مقادیر                                      | واحد             |
|-----------------------------|---|------------------|
| سطح ایستابی در کم‌ترین عمق  | ۱۰۰۰  | میلی‌متر         |
| سطح ایستابی در بیش‌ترین عمق | ۲۰۰۰  | میلی‌متر         |
| تأخیر آب زیرزمینی           | ۶   | روز              |
| نوع کود                     | اوره و سوپر تریپل فسفات (پخش جامد)          | -                |
| مقدار کود                   | ۹۰ و ۱۰۰                                    | کیلوگرم در هکتار |
| محصول زراعی                 | برنج  | -                |
| شاخص سطح برگ                | ۳   | -                |
| روش آبیاری                  | غرقاب دائم با ارتفاع ۵ سانتی‌متر آب روی خاک | -                |
| نوع زهکشی                   | زهکشی سطحی                                  | -                |

جدول ۲- کلاس‌های بافت خاک حوضه آبریز ناورود

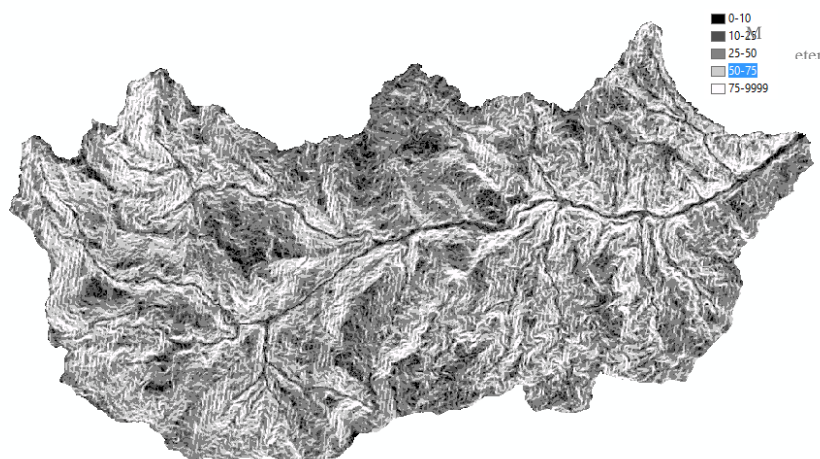
| نوع بافت خاک | درصد تحت پوشش | متوسط هدایت هیدرولیکی (mm/hr) | درصد شن | درصد سیلت | درصد رس | شوری خاک (ds/m) |
|--------------|---------------|-------------------------------|---------|-----------|---------|-----------------|
| لوم رسی      | ۵۷/۱۰         | ۳                             | ۳۶      | ۳۶        | ۳۴      | ۰/۶             |
| لوم          | ۸/۹۹          | ۲                             | ۲۲      | ۳۴        | ۴۴      | ۰/۸             |
| شنی لوم رسی  | ۸/۴۱          | ۲/۲                           | ۴۳      | ۲۶        | ۲۷      | ۱/۲             |
| رس           | ۱۳/۱۳         | ۲/۸                           | ۲۶      | ۳۴        | ۴۶      | ۰/۸             |
| سیلتی لوم رس | ۲/۹۱          | ۲/۷                           | ۱۳      | ۵۰        | ۳۷      | ۰/۶             |
| سیلتی رس     | ۵/۰۲          | ۲/۱                           | ۱۱      | ۴۶        | ۳۴      | ۰/۷             |
| رس شن        | ۴/۴۱          | ۲/۲                           | ۴۱      | ۳۳        | ۲۶      | ۰/۶             |

نقشه شیب حوضه آبریز: نرم افزار ArcSWAT به کاربر اجازه می دهد یک شیب ساده یا کلاس های مختلفی برای شیب حوضه انتخاب کند. در این پژوهش پنج کلاس برای شیب در نظر گرفته شد. مدل در پایان فرآیند طبقه بندی با استفاده از لایه DEM و کلاس های انتخاب شده توسط کاربر، یک نقشه شیب جهت استفاده در ادامه مراحل شبیه سازی آماده می کند. شکل (۳) نمایی از نقشه شیب تدوین شده در مدل SWAT را نشان می دهد. برای اطمینان از دقت نقشه شیب تولید شده موقعیت آبراهه های حاصل از آن، با نقشه آبراهه موجود از حوضه آبریز ناورود تطبیق داده شد و وضعیت آبراهه ها و نقطه ورود و خروج رودخانه ناورود به حوضه آبریز ناورود مشخص گردید.

نقشه کاربری اراضی: نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز ناورود در شکل (۲) نشان داده شده است. بر طبق این نقشه، انواع کاربری اراضی منطقه مطالعاتی عمدتاً شامل اراضی زراعی، جنگل و مراتع با تراکم های متفاوت است. بر اساس اطلاعات نقشه کاربری اراضی حوضه، حدود ۸/۵ درصد از حوضه دارای کاربری کشاورزی، که غالباً اراضی شالیزاری تحت کشت برنج بومی منطقه است، حدود یک درصد جزء مناطق مسکونی و مابقی پوشیده از مراتع و جنگل می باشد. نقشه کاربری اراضی را می توان به فرمت Shape و یا به فرم Raster جهت تعیین وسعت پوشش های گیاهی مختلف حوضه به مدل SWAT معرفی شد که دقت مکانی این نقشه ۳۰ متر می باشد.



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز ناورود ( شرکت سهامی آب منطقه ای گیلان)



شکل ۳- نقشه شیب تهیه شده حوضه آبریز ناورود توسط مدل SWAT

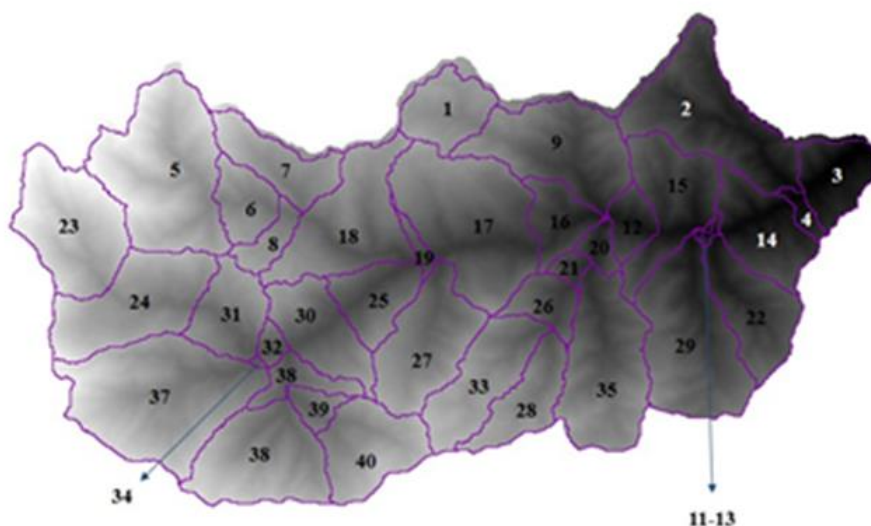
زیرحوضه ها بر اساس نقشه های بافت خاک، کاربری و شیب به واحدهای کوچکتر که همان HRUs هستند، تقسیم می گردد. با توجه به تغییرات مکانی بافت خاک و کاربری زمین ها و وضعیت

واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه: در روند شبیه سازی مدل SWAT، ابتدا بر اساس نقشه رقوم ارتفاعی و مسیر آبراهه ها یک حوضه به تعدادی زیرحوضه و سپس

در فرآیند شبیه‌سازی، زمانی می‌تواند وارد مدل شود که فرآیند توزیع HRUها صورت گرفته باشد. موقعیت ایستگاه‌های موجود و اطلاعاتی شامل درجه حرارت، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی به مدل وارد می‌شود. در این پژوهش تمامی پارامترها از ایستگاه‌های سینوپتیک، باران‌سنجی و یا از ماهواره TRMM دریافت شد. علت استفاده از داده‌های بارش TRMM کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی درحوضه بود. در این پژوهش تابش خورشیدی توسط مدل و با استفاده از زیر برنامه شبیه‌سازی تابش خورشیدی محاسبه شد. مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی در حوضه آبریز ناورود در جدول (۳) نشان داده شده است.

توپوگرافی منطقه، مدل حوضه را به ۴۰ زیرحوضه تقسیم نمود که موقعیت زیرحوضه‌ها و نحوه شماره‌گذاری آن‌ها در شکل (۴) نشان داده شد. در هر زیرحوضه مدل مساحتی را که دارای خصوصیات یکسان از نظر بافت خاک، کاربری و شیب باشد، به صورت جداگانه در یک واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) قرار می‌دهد. در این پژوهش تعداد ۱۵۷ واحد پاسخ هیدرولوژیکی برای حوضه آبریز ناورود توسط مدل تشکیل گردید. بعد از تشکیل HRUها، پارامترهای مربوط به هر کدام از اجزای اصلی مدل شامل پارامترهای گیاهی، خاکشناسی، رودخانه، مدیریتی، هواشناسی و آب زیرزمینی بر اساس آمار و داده‌های موجود به آن معرفی می‌شوند.

**داده‌های هواشناسی:** داده‌های آب و هوایی مورد استفاده



شکل ۴- موقعیت زیرحوضه‌های حوضه آبریز ناورود در مدل SWAT

جدول ۳- مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌های حوضه آبریز ناورود

| نوع ایستگاه                | بارش (mm) |       |       | درجه حرارت (°C) |       |       | رطوبت نسبی (%) |       | سرعت باد (m/s) |       |     |
|----------------------------|-----------|-------|-------|-----------------|-------|-------|----------------|-------|----------------|-------|-----|
|                            | حداکثر    | متوسط | حداقل | حداکثر          | متوسط | حداقل | حداکثر         | متوسط | حداکثر         | حداقل |     |
| سینوپتیک (تالش)            | ۱۴۴       | ۳     | ۰     | ۳۷              | ۱۹/۷  | ۲۰    | ۹۹             | ۷۸    | ۰              | ۳۵    | ۴/۲ |
| باران‌سنجی (خلیان و خرجیل) | ۱۴۲       | ۵     | ۰     | ۳۸/۵            | ۲۰/۲  | ۴۰    | ۹۷             | ۸۲    | ۰              | ۳۷    | ۵   |

گردد. در این پژوهش به منظور بررسی شوری رودخانه ناورود اطلاعات سرشاخه‌های رودخانه شامل بار شوری و دبی (مرز بالادست مدل) به صورت منبع آلودگی نقطه‌ای اعمال گردید. جدول (۴) مقادیر متوسط، حداقل و حداکثر دبی و شوری رودخانه ناورود را در سال‌های آماری نشان می‌دهد. جهت بیان

**شبیه‌سازی شوری در مدل SWAT:** اطلاعات داده‌های کمیت و کیفیت جریان از ایستگاه‌های هیدرومتری موجود بر روی رودخانه ناورود (خلیان و خرجیل)، دریافت و به صورت روزانه در مدل به کار گرفته شد. ورود اطلاعات نقاط آلاینده به مدل نیز با توجه به نوع آلاینده به چند طریق می‌تواند صورت

نسبت به انتقال نیتروژن تشابه بیش تری دارد اما لحاظ شدن انتقال املاح در پروفیل خاک و تاثیرپذیری فرآیند شبیه سازی از مدیریت کود بخش کشاورزی از ویژگی های مثبت شبیه سازی شوری با استفاده از چرخه نیتروژن محسوب می شوند. این در حالی است که در چرخه فلزات سنگین در مدل SWAT صرفاً انتقال توده های مورد توجه قرار گرفته است.

برای ارزیابی دقت داده های دبی جریان رودخانه، منحنی بارش-رواناب برای حوضه آبریز ناورود با استفاده از داده های ایستگاه باران سنجی ترسیم و با داده های موجود در ایستگاه هیدرومتری مقایسه گردید. بنابراین در برخی نقاط به دلیل عدم تطابق منحنی بارش-رواناب با داده های دبی ایستگاه هیدرومتری، این نقاط ابتدا اصلاح و سپس به کار گرفته شدند.

جدول ۴- مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط دبی و شوری در خروجی حوضه آبریز ناورود

| دوره آماری | دبی (m <sup>3</sup> /s) |        | کل جامدات محلول (mg/l) |        | متوسط | متوسط |
|------------|-------------------------|--------|------------------------|--------|-------|-------|
|            | حداقل                   | حداکثر | حداقل                  | حداکثر |       |       |
| ۲۰۰۶       | ۱/۶۷                    | ۲/۹۸   | ۱۵۸                    | ۲۴۳    | ۲۱۵   | ۲۱۵   |
| ۲۰۰۷       | ۲/۵۳                    | ۷/۱۵   | ۱۴۶                    | ۲۴۰    | ۲۰۲   | ۲۰۲   |
| ۲۰۰۸       | ۱/۱۹                    | ۸/۱۳   | ۱۳۵                    | ۲۳۹    | ۱۷۸   | ۱۷۸   |
| ۲۰۰۹       | ۱/۶۳                    | ۴/۸۴   | ۱۶۹                    | ۲۵۸    | ۲۱۰   | ۲۱۰   |
| ۲۰۱۰       | ۲/۱۱                    | ۸/۴۱   | ۱۸۲                    | ۲۳۲    | ۲۰۶   | ۲۰۶   |
| ۲۰۱۱       | ۱/۸۰                    | ۵/۸۵   | ۱۱۶                    | ۲۳۰    | ۱۸۸   | ۱۸۸   |
| ۲۰۱۲       | ۱/۳۶                    | ۸/۴۷   | ۱۵۲                    | ۲۲۹    | ۱۹۵   | ۱۹۵   |
| ۲۰۱۳       | ۱/۷۸                    | ۵/۳۹   | ۱۳۵                    | ۲۱۲    | ۱۷۸   | ۱۷۸   |

آنالیز حساسیت مدل: شناسایی پارامترهای مؤثر بر نتایج خروجی مدل، امری ضروری است، که این فرآیند تحت عنوان آنالیز حساسیت معرفی می شود. در مدل های نیمه توزیعی مانند SWAT که دارای تعداد پارامترهای ورودی زیاد هستند، با انجام آنالیز حساسیت، تعداد پارامترهای واسنجی کاهش داده می شود. در این پژوهش از برنامه SWAT-CUP (Abbaspour, 2009) که به منظور سهولت فرآیند واسنجی و آنالیز حساسیت مدل SWAT توسعه یافته است و روش (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2 SUFI-2) استفاده گردید. این روش، تمام عدم قطعیت ها، شامل عدم قطعیت ورودی ها مانند بارندگی، مدل مفهومی، پارامترها و داده های اندازه گیری شده در مدل سازی را لحاظ می شود. سنجش آماری عدم قطعیت در روش SUFI2 با استفاده از شاخص های R-factor و P-factor انجام شد (جداول ۷ و ۸). با بررسی مطالعات پیشین همچون اخوان و همکاران (Akhavan et al., 2010)، لام و همکاران (Lam et al., 2010)، ستگن و همکاران (Setgen et al., 2008)، شن و همکاران (Shen et al., 2013) و اخباری و همکاران (Akhbari et al., 2013) در خصوص شبیه سازی کمیت و کیفیت رودخانه ها با استفاده از مدل SWAT، ۱۲ پارامتر که بر روی دبی و کیفیت آب خروجی از حوضه مؤثر هستند، شناسایی شد. آنالیز حساسیت مدل SWAT در حوضه آبریز ناورود بر روی ۱۲ پارامتر مذکور انجام و نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است. از شاخص P-value جهت تشخیص پارامترهای حساس استفاده شد. هرچه مقدار این شاخص برای یک پارامتر کمتر و به صفر نزدیک تر باشد، پارامتر مورد نظر در بهینه یابی اثر بیشتری دارد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت شش پارامتر ALPHA\_BF, SOL\_K, SOL\_NO3, GW\_DELAY, CN2 و SHALLST در حوضه آبریز ناورود تأثیرگذارتر تشخیص داده شد که در مقادیر بهینه آن ها در مرحله واسنجی مدل به دست آمد (جدول ۶).

شوری آب رودخانه از مفهوم کل جامدات محلول (TDS) استفاده شد. بار شوری متوسط ماهانه در رودخانه با استفاده از مفهوم TDS محاسبه و شبیه سازی آن در مدل طی دو چرخه ۱- فلزات سنگین و ۲- نیتروژن انجام شد. در چرخه فلزات سنگین، مقدار کل جامدات محلول جایگزین غلظت فلز و در چرخه نیتروژن مقدار کل جامدات محلول جایگزین نیتروژن شد. از آنجا که در چرخه نیتروژن فرآیندهای تبدیل و تخریب فرم نیتروژن به شکل های نترات، نیتريت و گاز نیتروژن وجود دارد، به منظور لحاظ نشدن این فرآیندها در شبیه سازی شوری که یک پارامتر کیفی پایستار محسوب می شود، تمام ضرایب و نرخ های تبدیل و تخریب نیتروژن صفر در نظر گرفته شد. اگرچه ماهیت شبیه سازی شوری به فرآیند انتقال فلزات سنگین

آنالیز حساسیت مدل: شناسایی پارامترهای مؤثر بر نتایج خروجی مدل، امری ضروری است، که این فرآیند تحت عنوان آنالیز حساسیت معرفی می شود. در مدل های نیمه توزیعی مانند SWAT که دارای تعداد پارامترهای ورودی زیاد هستند، با انجام آنالیز حساسیت، تعداد پارامترهای واسنجی کاهش داده می شود. در این پژوهش از برنامه SWAT-CUP (Abbaspour, 2009) که به منظور سهولت فرآیند واسنجی و آنالیز حساسیت مدل SWAT توسعه یافته است و روش (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2 SUFI-2) استفاده گردید. این روش، تمام عدم قطعیت ها، شامل عدم قطعیت ورودی ها مانند بارندگی، مدل مفهومی، پارامترها و داده های اندازه گیری شده در مدل سازی را لحاظ می شود. سنجش آماری عدم قطعیت در روش SUFI2 با استفاده از شاخص های R-factor و P-factor انجام شد (جداول ۷ و ۸). با بررسی مطالعات پیشین همچون اخوان و همکاران (Akhavan et al., 2010)، لام و همکاران (Lam et al., 2010)، ستگن و همکاران (Setgen et al., 2008)، شن و همکاران (Shen et al., 2013) و اخباری و همکاران (Akhbari et al., 2013) در خصوص شبیه سازی کمیت و کیفیت رودخانه ها با استفاده از مدل SWAT، ۱۲ پارامتر که بر روی دبی و کیفیت آب خروجی از حوضه مؤثر هستند، شناسایی شد. آنالیز حساسیت مدل SWAT در حوضه آبریز ناورود بر روی ۱۲ پارامتر مذکور انجام و نتایج آن در جدول (۵) نشان داده شده است. از شاخص P-value جهت تشخیص پارامترهای حساس استفاده شد. هرچه مقدار این شاخص برای یک پارامتر کمتر و به صفر نزدیک تر باشد، پارامتر مورد نظر در بهینه یابی اثر بیشتری دارد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت شش پارامتر ALPHA\_BF, SOL\_K, SOL\_NO3, GW\_DELAY, CN2 و SHALLST در حوضه آبریز ناورود تأثیرگذارتر تشخیص داده شد که در مقادیر بهینه آن ها در مرحله واسنجی مدل به دست آمد (جدول ۶).

جدول ۵- نتایج آنالیز حساسیت مدل SWAT در حوضه آبریز ناورود

| نام پارامتر در مدل | توضیحات                                     | p-value |
|--------------------|---|---------|
| CN2                | شماره منحنی رواناب در شرایط رطوبتی متوسط    | ۰       |
| GW_DELAY           | ضریب تأخیر آب زیرزمینی (day)                | ۰       |
| SOL_AWC            | ظرفیت آب قابل دسترس خاک                     | ۰/۲۵    |
| SOL_NO3            | نیترات خاک (Kg/h)                           | ۰/۱۷    |
| SOL_K              | هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (cm/day)          | ۰/۱۴    |
| IRR_SALT           | شوری آب آبیاری (mg/kg)                      | ۰/۴۵    |
| IRR_AMT            | عمق آب آبیاری بر روی سطح خاک (mm)           | ۰/۵۴    |
| ALPHA_BF           | ضریب عکس‌العمل آب زیرزمینی (day)            | ۰/۰۲    |
| SHALLST            | عمق اولیه سطح ایستایی در آبخوان کم عمق (mm) | ۰/۰۵    |
| SURLAG             | ضریب تأخیر رواناب                           | ۰/۲۷    |
| SHALLST_N          | نیتروژن آب زیرزمینی (Kg)                    | ۰/۸۳    |
| SOL_EC             | هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (ds/m)       | ۰/۳۹    |

جدول ۶- مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل SWAT در حوضه آبریز ناورود

| نام پارامتر در مدل | دامنه تغییرات | مقادیر بهینه |
|--------------------|---------------|--------------|
| CN2                | ۶۵-۹۵         | ۷۱           |
| SOL_K (cm/day)     | ۰-۷           | ۴/۸۷         |
| GW_DELAY (day)     | ۰-۳۰          | ۲۵           |
| ALPHA_BF (day)     | ۰/۰۳-۱        | ۰/۳۸۵        |
| SHALLST (mm)       | ۰-۵۰۰۰        | ۶۲۵          |
| SOL_NO3 (kg/h)     | ۰-۱۰۰         | ۴۷           |

$$NS=1-\frac{\sum_i(Q_m-Q_s)^2}{\sum_i(Q_{m,i}-\bar{Q}_m)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$D=1-\frac{\sum_i(Q_m-Q_s)^2}{\sum_i(Q_s-\bar{Q}_m)^2+\sum_i(Q_m-\bar{Q}_m)^2} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N(Q_m-Q_s)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط ذکر شده،  $Q_{m,i}$  مقادیر اندازه گیری شده،  $Q_{s,i}$  مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل،  $\bar{Q}_m$  متوسط مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{Q}_s$  متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشد. دونیگیان و همکاران (Donigian *et al.*, 2000) گزارش نمود که ضریب  $R^2$  برای جریان روزانه کم‌تر از ۰/۱۶، ۰/۱۷-۰/۱۶، ۰/۱۸-۰/۱۷ و بزرگ‌تر از ۰/۱۸ به صورت ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب طبقه‌بندی می‌گردد. موریا سی و همکاران (Moriasi *et al.*, 2007) طبقه‌بندی نرخ اجرای NS را برای جریان ماهانه کم‌تر از ۰/۱۵، ۰/۱۶۵-۰/۱۵، ۰/۱۷۵-۰/۱۶۵ و بیش‌تر از ۰/۱۷۵ را به ترتیب به صورت عدم رضایت‌بخشی، رضایت‌بخش، خوب و بسیار خوب پیشنهاد کردند.

### نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل در شبیه‌سازی دبی رودخانه در دو ایستگاه هیدرومتری، خلیان در مرکز ثقل و خرجگیل در خروجی حوضه آبریز ناورود در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل SWAT همبستگی مناسبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جریان در رودخانه

### واسنجی و اعتبارسنجی مدل: پس از انجام آنالیز

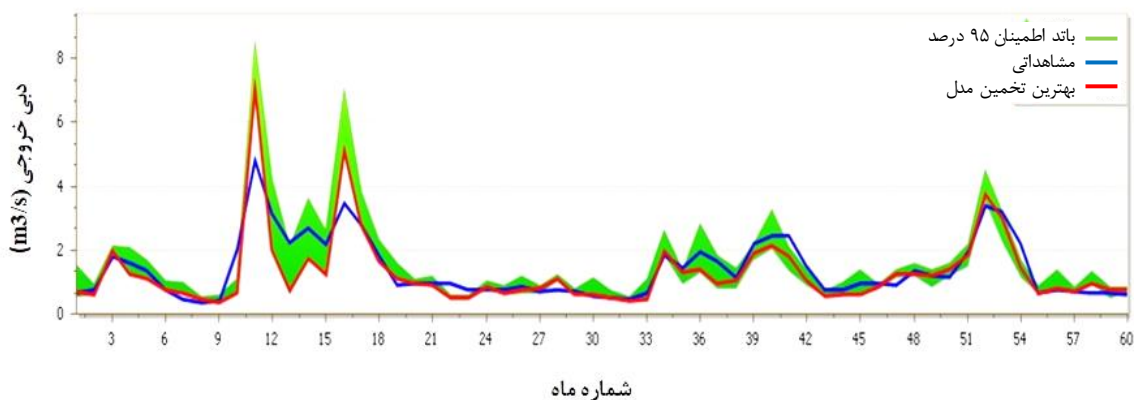
حساسیت، مدل با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده دبی و شوری رودخانه بین سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۶ با گام زمانی ماهانه در دو ایستگاه هیدرومتری حوضه آبریز به نام‌های خلیان و خرجگیل واسنجی گردید. پس از اتمام مرحله‌ی واسنجی، اعتبارسنجی مدل با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده متوسط ماهانه دبی و شوری رودخانه بین سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۰ در دو ایستگاه خلیان و خرجگیل انجام شد. همچنین به منظور تحلیل نتایج واسنجی و کارایی مدل، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب نش-ساتکلیف (NS)، شاخص رضایت‌مندی مدل (D) و ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE) استفاده شد که معادلات آن‌ها به ترتیب در روابط (۲)، (۳)، (۴) و (۵) آمده است.

$$R^2 = \frac{[(Q_{m,i}-\bar{Q}_m)(Q_{s,i}-\bar{Q}_s)]^2}{\sum(Q_{m,i}-\bar{Q}_m)^2 \sum(Q_{s,i}-\bar{Q}_s)^2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

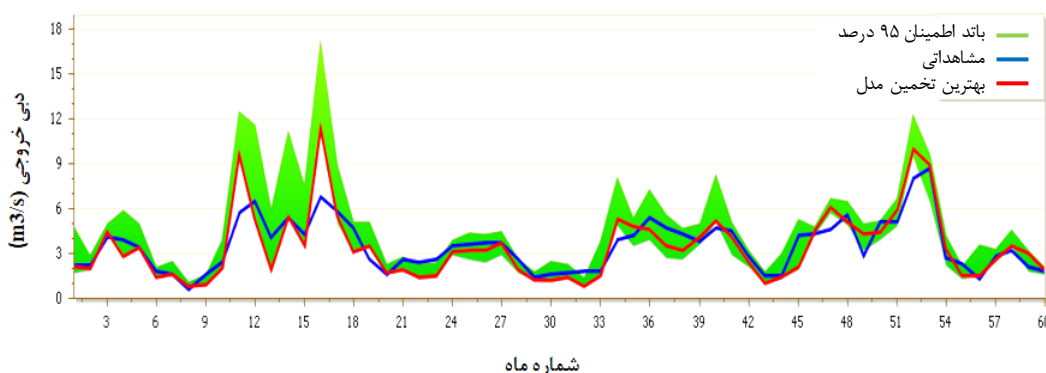


خوب و بسیار خوب پیشنهاد کردند. شاخص‌های آماری محاسبه شده در مرحله واسنجی مدل در جدول (۷) آمده است. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری، مدل در شبیه‌سازی جریان بسیار خوب عمل نمود. همچنین بر اساس شاخص آماری NS، کارایی و رضایت‌مندی مدل در طبقه‌بندی رضایت‌مندی قرار گرفت. Lam et al. (2010) نیز در پژوهش خود در دوره واسنجی مقادیر ۰/۶۸ و ۰/۷۵ را برای NS در شبیه‌سازی دبی و نیترات حوضه گزارش نمودند. همچنین مقادیر بدست آمده نسبتاً کوچک r-factor (حالت ایده‌آل صفر) بیانگر واسنجی خوب و مقادیر بالای p-factor (حالت ایده‌آل یک) نشان‌دهنده درصد مناسب داده‌های مشاهداتی در باند تخمین عدم قطعیت ۹۵ درصد می‌باشد.

ناورود نشان داد. نتایج حاکی از آن است که در اکثر ماه‌های سال، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل انطباق خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری شده داشت اما در ماه‌های پر بارش مدل مقادیر دبی را بیش‌تر برآورد نمود. اگرچه در زمان‌های پر بارش مدل SWAT مقادیر دبی را بیش برآورد نموده اما در شناسایی زمان رخ دادن این نقاط به خوبی عمل نمود. Donigian (2000) گزارش نمود که ضریب  $R^2$  برای دبی ماهانه کم‌تر از ۰/۶، ۰/۷ - ۰/۸، ۰/۶ - ۰/۷ و بزرگ‌تر از ۰/۸ به صورت ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب طبقه‌بندی می‌گردد. Moriasi et al. (2007) طبقه‌بندی نرخ اجرای NS را برای جریان ماهانه کم‌تر از ۰/۵ - ۰/۶۵، ۰/۵ - ۰/۶۵ و بیش‌تر از ۰/۷۵ را به ترتیب به صورت عدم رضایت‌بخشی، رضایت‌بخش،



شکل ۴- نتایج واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه آبریز ناورود (ایستگاه خلیان)



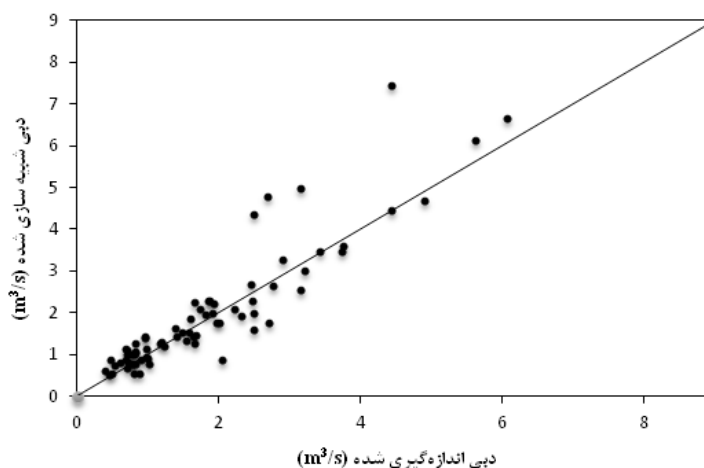
شکل ۵- نتایج واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه آبریز ناورود (ایستگاه خرگیل)

جدول ۷- نتایج واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی حوضه آبریز ناورود

| نام ایستگاه | طول دوره آماری | NS   | D    | $R^2$ | r-factor | p-factor | RMSE ( $m^3/s$ ) |
|-------------|----------------|------|------|-------|----------|----------|------------------|
| خلیان       | ۶۰ ماه         | ۰/۷۲ | ۰/۷۷ | ۰/۸۰  | ۰/۱۱     | ۰/۷۷     | ۰/۴۱             |
| خرگیل       | ۶۰ ماه         | ۰/۶۱ | ۰/۶۷ | ۰/۸۱  | ۰/۱۶     | ۰/۸۳     | ۰/۵۲             |

محدوده تعریف شده برای شاخص نش-ساتکلیف ( Nash and Sutcliffe., 1970; XU et al., 2009)، اگرچه عملکرد مدل در مرحله اعتبارسنجی به دقت واسنجی نبود، اما شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز ناورود با استفاده از مدل SWAT عالی و رضایت‌بخش بود.

نتایج اعتبارسنجی مدل SWAT در دوره آماری ۲۰۱۳-۲۰۱۱ در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت مدل در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی تا اندازه‌های کاهش یافته است. شاخص‌های آماری مورد نظر در مرحله اعتبارسنجی در جدول (۳) آمده است. با توجه به



شکل ۶- همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده دبی در حوضه آبریز ناورود در مرحله اعتبارسنجی

دقت اندازه‌گیری در ایستگاه هیدرومتری آن بالاتر است. همچنین در در بالادست ایستگاه هیدرومتری خلیان به دلیل کمبود داده‌های بارش، از محصول بارش TRMM استفاده شد، در نتیجه مقداری خطا به محاسبات دبی و بار شوری در ایستگاه خلیان به دلیل کاربرد این نوع داده، وارد گردید. این مورد در شبیه‌سازی شوری تحت چرخه فلزات سنگین نیز صدق می‌کند. نتایج اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی شوری رودخانه در جدول (۹) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت شبیه‌سازی نسبت به مرحله واسنجی کاهش پیدا کرد اما با این وجود عملکرد مدل رضایت‌بخش بود. همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری حوضه در شکل (۷) نشان داده شده است.

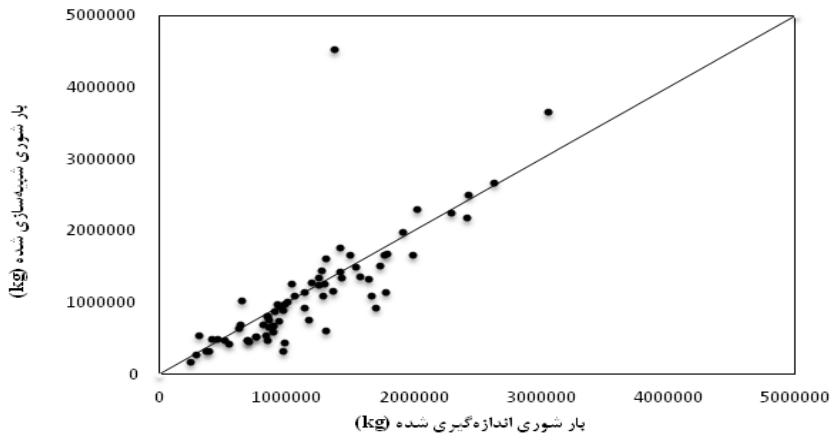
شاخص‌های آماری محاسبه‌شده در مرحله واسنجی مدل در شبیه‌سازی شوری در جدول (۸) ارائه شده است. Geza and Mc Cray (2008) در مطالعه خود مقادیر NS در محدوده ۰/۷۵-۰/۳۶ را برای شبیه‌سازی انتقال املاح رضایت بخش عنوان نمودند. بنابراین با توجه به مقدار به دست آمده NS در مرحله واسنجی برای دو ایستگاه که برابر با ۰/۴۳ و ۰/۵۱ بود، عملکرد مدل در شبیه‌سازی بار شوری تحت چرخه نیتروژن در مرحله واسنجی رضایت‌بخش می‌باشد، در نتیجه می‌توان از آن در تحلیل پدیده انتقال با شوری در حوضه آبریز ناورود استفاده کرد. مقایسه شاخص‌های آماری شبیه‌سازی بار شوری در ایستگاه خلیان و خرگیل نشان داد که مدل در ایستگاه خرگیل از دقت بیشتری برخوردار است. ایستگاه خرگیل نقطه خروجی حوضه آبریز ناورود است که به دلیل اهمیت آن،

جدول ۸- نتایج واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی بار شوری رودخانه ناورود با استفاده از چرخه نیتروژن

| نام ایستگاه | طول دوره آماری | NS   | D    | R <sup>2</sup> | r-factor | p-factor | RMSE (kg) |
|-------------|----------------|------|------|----------------|----------|----------|-----------|
| خلیان       | ۶۰ ماه         | ۰/۴۳ | ۰/۶۵ | ۰/۵۲           | ۰/۰۲     | ۰/۷۴     | ۰/۴۸      |
| خرگیل       | ۶۰ ماه         | ۰/۵۱ | ۰/۶۵ | ۰/۷۴           | ۰/۰۴     | ۰/۸۷     | ۰/۵۶      |

جدول ۹- نتایج اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی شوری حوضه آبریز ناورود تحت چرخه نیتروژن

| نام ایستگاه | طول دوره آماری | NS   | D    | R <sup>2</sup> | RMSE (kg) |
|-------------|----------------|------|------|----------------|-----------|
| خلیان       | ۳۶ ماه         | ۰/۳۸ | ۰/۷۷ | ۰/۴۸           | ۰/۷۰      |
| خرگیل       | ۳۶ ماه         | ۰/۴۲ | ۰/۷۰ | ۰/۵۶           | ۰/۷۰      |



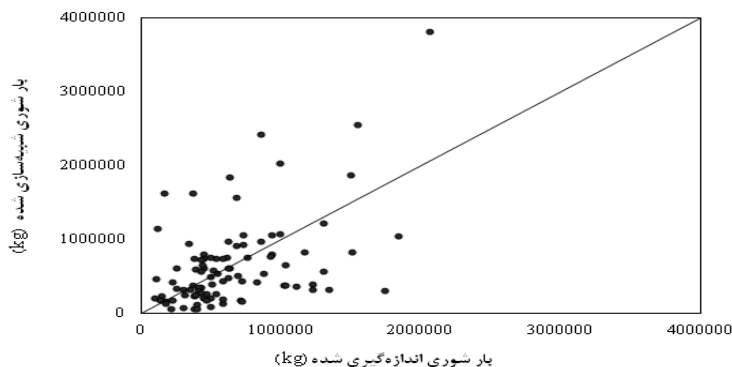
شکل ۷- همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بار شوری در کل حوضه آبریز ناورود در مرحله اعتبارسنجی تحت چرخه نیتروژن

چرخه نیتروژن در آب و خاک رخ می‌دهد را مورد بررسی قرار می‌دهد، درحالی‌که در چرخه فلزات سنگین، مدل تنها از معادله بقای جرم تبعیت می‌کند و تنها اثر فرآیندها و فعالیت‌های نقطه‌ای و متمرکز بر انتقال املاح را شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین از آنجا که چرخه فلزات سنگین قادر به لحاظ نمودن نهاده کوددهی بر شوری آب و خاک نیست و با توجه به نتایج این پژوهش که تفاوت محسوسی در دقت شبیه‌سازی وجود دارد، در شبیه‌سازی شوری منابع آب در حوضه‌های آبریز دارای فعالیت‌های کشاورزی توصیه نمی‌شود.

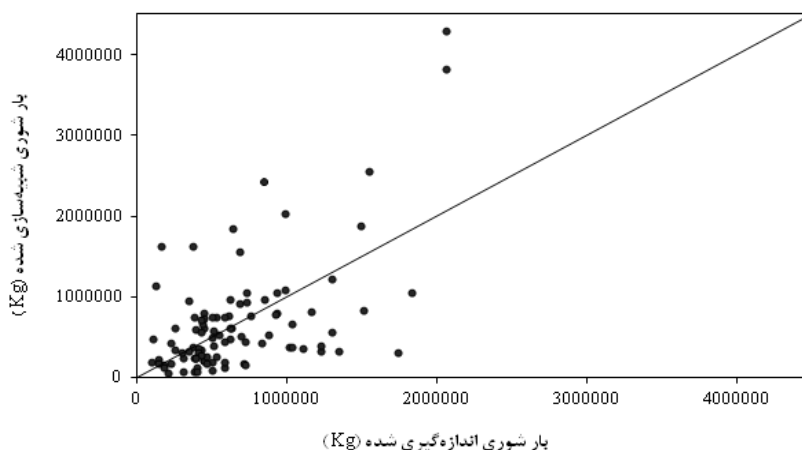
همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با استفاده از چرخه فلزات سنگین در دو ایستگاه هیدرومتری خلیان و خرچگیل حوضه آبریز ناورود به ترتیب در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی مناسبی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بار شوری تحت چرخه فلزات سنگین در دو ایستگاه خلیان و خرچگیل حوضه آبریز ناورود وجود ندارد. پراکندگی داده‌ها نسبت به خط یک به یک در چرخه فلزات نسبت به چرخه نیتروژن بیشتر است. نتایج شبیه‌سازی بار شوری رودخانه ناورود با استفاده از چرخه نیتروژن و چرخه فلزات سنگین در جدول (۱۰) آمده است. با توجه به ضریب  $R^2$ ، دقت مدل در شبیه‌سازی بار شوری در چرخه نیتروژن نسبت به چرخه فلزات سنگین بیشتر بود. شاخص NS به‌دست آمده در چرخه فلزات سنگین زیر صفر بود که این مسئله اختلاف زیاد مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و حاکی از عدم رضایت‌مندی نتایج مدل است. علت این تفاوت دقت شبیه‌سازی در دو چرخه مورد بررسی ناشی از تفاوت در فرآیندهای مدل‌سازی در چرخه نیتروژن و فلزات سنگین در مدل SWAT است. مدل SWAT تمامی فرآیندهایی که در

جدول ۱۰- مقایسه نتایج شبیه‌سازی شوری حوضه آبریز ناورود تحت دو چرخه نیتروژن و

| فلزات سنگین در مدل SWAT در بازه‌های زمانی ۲۰۰۶-۲۰۱۳ |       |              |       | شاخص آماری |
|---|-------|--------------|-------|------------|
| چرخه فلزات سنگین                                    |       | چرخه نیتروژن |       |            |
| خرچگیل  | خلیان | خرچگیل       | خلیان |            |
| ۰/۲۷  | ۰/۳۳  | ۰/۶۴         | ۰/۶۱  | $R^2$      |
| ۰/۴۴  | ۰/۴۳  | ۰/۶۶         | ۰/۷   | D          |
| -۰/۸۷   | -۰/۶۹ | ۰/۴۷         | ۰/۴۴  | NS         |
| ۰/۵۲  | ۰/۵۷  | ۰/۴۳         | ۰/۴۵  | RMSE (kg)  |



شکل ۸- همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بار شوری در ایستگاه خلیان حوضه آبریز ناورود تحت چرخه فلزات سنگین در مدل SWAT



شکل ۹- همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده بار شوری در ایستگاه خرجیل حوضه آبریز ناورود تحت چرخه فلزات سنگین در مدل SWAT

## نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT برای شبیه‌سازی دبی و بار شوری در حوضه آبریز ناورود نشان از دقت مناسب مدل دارد. در هر دو ایستگاه حوضه آبریز ناورود، مدل با دقت مناسبی دبی رودخانه را شبیه‌سازی نمود. دقت شبیه‌سازی بار شوری حوضه آبریز ناورود به روش چرخه نیترات، نسبت به چرخه انتقال فلزات سنگین بیشتر بود، هرچند دقت مدل بسیار

تحت تأثیر اطلاعات بارندگی در نزدیکی دو ایستگاه مورد بررسی داشت. ضرایب NS و  $R^2$  در شبیه‌سازی شوری کل حوضه آبریز ناورود تحت چرخه نیتروژن برابر با ۰/۴۵ و ۰/۶۴ و در چرخه فلز برابر ۰/۷۱- و ۰/۳۰ به دست آمد. بنابراین استفاده از چرخه نیتروژن مدل SWAT در شبیه‌سازی شوری حوضه آبریز شامل فعالیت‌های کشاورزی قابل توصیه است.

## REFERENCES

- Abbaspour, K. (2009). SWAT-CUP2; SWAT Calibration and Uncertainty Programs user manual.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, r., Bongner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. (2006). Modeling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333:413-430.
- Abbaspour, K., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine thur watershed using swat. *Journal of Hydrology*, 333: 2-4.
- Akhavan, S., Abedi-Koupai, J., Mousavi, S.F., Afyuni, M., Eslamian S.S., and Abbaspour, K.C. (2010). Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agricultur, Ecosystems and Environment*, 139: 675-688.
- Akbari Mejdari, H., Bahremand, A.R., Najafinejad, A. and Sheikh, V.B. (2013). Daily flow simulation of Chehelchai river Golestan province using SWAT model. *Journal of Water and Soil Conservation*. 20(3): 253-259 (In Farsi).
- Akhbari, M., Neil, S. and Grigg, F. (2013). Water Management Trade-offs between Agriculture and the Environment: A Multiobjective Approach and Application. *Journal of Irrig. Drain Eng.*, 05014005: 1-11.
- Arnold, J., and Allen, P. 1996. Estimating hydrologic budgets for free Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, 176: 57-77
- Arnold, J.G., Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrological Process*, 19: 563-572.
- Chen, Y., Shuai, J., Zhang, Z., Shi, P., and Tao, F. (2014). Simulating the impact of watershed management for surface water quality protection. *Ecological Engineering*, 62, 61- 70.
- Donigian A.S. (2000). HSPF Training Workshop Handbook and CD, Lecture 19, Calibration and verification Issues, Slide L19-22. EPA Headquarters, Washington Information Center, Presented and prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC.
- Faramarzi, M., K.C. Abbaspour, R. Schulin, and H. Yang, (2009), "Modelling blue and green water resources availability in Iran" *Hydrological Processes*, Vol. 23: pp 486-501.
- Galván, L., Olías, M., Fernandez de Villarán, R., Domingo Santos, J.M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M. and Cánovas, C.R. (2009). Application of

- the SWAT model to estimation of transported pollutant load an AMD-affected river (Meca River, SW Spain). *Journal of Hydrology*, 377: 445-454.
- Geza, M., and McCray, J.E. (2008). Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, 88(3): 393-406.
- Golmohammadi, G., Prasher, S.O., Madani, A. and Rudra, R. (2013). Using SWAT to evaluate climate change impact on water resources: Case study in Canagagigue Creek Watershed, Canada. EIC Climate Change Technology Conference.
- Lam, Q.D., Schmalz, B. and Fohrer, N. (2011). Modelling point and diffuse source pollution of nitrate in a rural lowland catchment using the SWAT model. *Agricultural Water Management*, 97: 317-325.
- Ministry of Power. (2005). Guideline of segmentation and coding of watershed and studying area.
- Moriassi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D. and Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE*, 50(3): 885-900.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3): 282-290.
- Natural resources of Gilan province. (2004). Multi master plan report of Navrood basin.
- Oeurng, C., Sauvage, S and Sanchez-Perez, J.M. (2011). Assessment of Hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using SWAT model. *Journal of Hydrology*, 401: 373-380.
- Prasuhn, V and Sieber, U. (2005). Changes in diffuse phosphorus and nitrogen inputs into surface waters in the Rhine watershed in Switzerland. *Aquat. Science*, 67: 363-371.
- Setegn S. G., R. Srinivasan and B. Dargahi, (2008), "Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model", *The Open Hydrology Journal*, No. 2: pp 49-62.
- Shen, Z., L. Chen, Q. Hong, J. Qiu, H. Xie, and R. Liu, (2013), "Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the Three Gorges Reservoir Area", *Science of the Total Environment*, Vol. 454-455: pp 383-392.
- Tripathi, M. P., Panda, R.K., Raghuvanshi, N.S. and Singh, R. (2004). Hydrological modeling of a small watershed using generated rainfall in the soil and water assessment tool model. *Hydrological Process*, 18: 1811-1821.
- Xu, Z.X., Pang, J.P., Liu, C.M., and Li, J.Y. (2009). Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. *Hydrological Process*, 10: 1002-1014.