

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

صفحه‌های ۲۵۰-۲۳۷

# مدل‌سازی سهم مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال بار آلودگی فسفات در کاربری‌های کشاورزی، جنگل و مرتع با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز تجن)

فاطمه رجائی<sup>\*</sup>، عباس اسماعیلی ساری<sup>۲</sup>، عبدالرسول سلمان ماهینی<sup>۳</sup>، مجید دلاور<sup>۴</sup> و علی‌رضا مساح یوانی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۲. استاد، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
۳. دانشیار، گروه محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
۴. استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۵. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۹

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۲۵

### چکیده

خصوصیات کیفی آب از مؤلفه‌هایی است که ضرورت لحاظ آن در برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت منابع آب کاملاً احساس شده است. آلودگی‌های غیرنقطه‌ای سهم مهمی در تغذیه‌گرایی آب‌های شیرین دارد. از دلایل اساسی این موضوع وجود مواد مغذی به‌ویژه نیتروژن و فسفر در غلظت‌های بالا در منابع آب است. درک ارتباط آلودگی فسفات با انواع کاربری اراضی و بررسی تأثیر مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال اولیته به منظور ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی است. بنابراین، در این مطالعه از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) برای شبیه‌سازی فسفات در حوضه آبخیز تجن استفاده شده است. نتایج مدل واسنجی شده نشان داد بار سالانه فسفات از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ از حدود ۲۹۰۰۰ تا ۱۰۲۹۰۰ کیلوگرم در خروجی حوضه متفاوت است. کاربری جنگل، کشاورزی و مرتع به ترتیب ۵۴، ۱۹ و ۲۴ درصد از مساحت منطقه و ۲۴، ۲۴ و ۴۴/۸ درصد از بار آلودگی فسفات را تولید می‌کند. در میان کشت‌های کشاورزی، گندم‌زار آلودگی کمتری تولید می‌کند. نتایج بررسی مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال فسفات نشان داد در همه کاربری‌ها به جز کاربری مرتع، سازوکار اصلی انتقال فسفات از طریق رسوبات است. بنابراین، نتایج حاصل از این مطالعه راهنمای خوبی برای حفاظت حوضه آبخیز تجن در برابر تخریب بیشتر و ترویج توسعه پایدار است.

کلیدواژه‌ها: تبخیر و تعرق گیاهی، شبیه‌سازی فسفات، عملکرد محصول، واسنجی و اعتبارسنجی، نرم‌افزار SWAT CUP.

## مقدمه

از مهم‌ترین عوامل مؤثر در توسعه پایدار و ارزیابی سلامت حوضه‌ای آبخیز فراهم کردن منابع آبی مناسب از نظر کمی و کیفی است. هم‌گام با پیشرفت صنایع، افزایش جمعیت خطرات زیادی از نظر آلودگی به منابع آبی وارد آورده است. منابع آلوده‌کننده آب را به‌طور کلی می‌توان به دو دسته نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای تقسیم کرد. آلودگی آب از طریق منابع غیرمتمرکز حاصل کارکرد طیف وسیعی از فعالیت‌های انسانی است، به‌طوری که در بسیاری از کشورها انواع فعالیت‌های کشاورزی و دامداری کانون‌های غیرنقطه‌ای آلودگی در نظر گرفته شده است. آلودگی‌های غیرنقطه‌ای فاکتور مهمی در تعیین کیفیت آب است و سهم مهمی در تغذیه‌گرایی<sup>۱</sup> آب‌های شیرین دارد. از دلایل اساسی این موضوع وجود مواد مغذی به ویژه نیتروژن و فسفر در غلظت‌های بالا در آب است. برهم‌خوردن تعادل مواد مغذی منجر به تغییرات فیزیکی و شیمیایی، به‌خصوص تغییر شرایط pH، اکسیژن محلول، شفافیت و غلظت کلروفیل a می‌شود (۱۰).

مطالعات زیادی در خصوص تأثیر کاربری اراضی بر آلودگی‌های منابع غیرنقطه‌ای در جهان صورت گرفته است؛ از جمله در مطالعه‌ای در انگلستان در زمینه تأثیر کاربری اراضی و نوع خاک بر فسفر چسبیده به ذرات رسوبی معلق و ته‌نشین شده به این نتیجه رسیدند که توزیع مکانی منابع رسوب در سرتاسر حوضه یکسان نیست. مناطق مهم از نظر منابع فسفر و رسوب مناطقی است که از لحاظ رواناب تولیدی و فرسایش‌پذیری خاک پتانسیل بالایی دارد (۹). همچنین، از روش‌های آماری رج‌بندی مستقیم<sup>۲</sup> و مدل SWAT<sup>۳</sup> برای ارزیابی ارتباط بین کاربری

اراضی، الگوی سیمای سرزمین و آلودگی‌های غیر نقطه‌ای استفاده شده است. نتایج وجود ارتباط بین کاربری اراضی و سیمای سرزمین با آلودگی‌های غیر نقطه‌ای را نشان داد و زمین‌های دیم<sup>۴</sup> و شالیزارها مهم‌ترین منبع آلودگی منابع غیرنقطه‌ای شناسایی شد (۱۲).

در حوضه آبخیز دریاچه بزرگ لارنتین در کانادا مدل SWAT برای پیش‌بینی رسوب و بار مواد مغذی استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از توانایی بالای مدل در برآورد بار رسوب و رواناب است. شبیه‌سازی بار مواد مغذی نسبت به رواناب و رسوب ضعیف‌تر است، ولی نتایج در کل رضایت‌بخش بود (۱۷). همچنین، مدل SWAT در تعیین میزان تجاوز بار فسفات از استانداردهای کیفیت آب و نیز شناسایی تأثیر شیوه‌های مدیریتی مختلف برای رسیدن به استانداردهای کیفیت آب استفاده شده است (۱۶). در مطالعه دیگری مدل SWAT برای شبیه‌سازی نیترات، فسفات و رسوب به‌صورت تک‌مکانه و چند مکانی کالبره شد. نتایج نشان داد کالبره کردن چند مکانه شبیه‌سازی رسوب را بهبود نمی‌بخشد، اما تا حدودی شبیه‌سازی نیترات و فسفات را بهبود می‌بخشد (۱۹). مدل SWAT در بررسی تغذیه‌گرایی و بار مجاز فسفر ورودی به مخازن نیز استفاده شده است. نتایج نشان داد که بیشتر بار آلودگی مواد مغذی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است و بیشترین خروجی نیتروژن و فسفر کل به ترتیب در ماه اکتبر و سپتامبر رخ داده است که ناشی از افزایش کوددهی و ذخیره آن در خاک است (۲، ۵).

چنانکه بیان شد مدل‌های هیدرولوژیکی در تحقیقات برای شبیه‌سازی آلودگی‌های غیرنقطه‌ای استفاده شده است. مطالعات ذکر شده نشان می‌دهد که مدل SWAT از جمله مدل‌هایی است که توانایی شبیه‌سازی متغیرهای کمی و

1. eutrophication
2. constrained ordination
3. soil and water assesment tool

4. dry cultivated land

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق حوضه آبخیز تجن با وسعت تقریبی ۴۰۰۰ کیلومتر مربع است که در استان مازندران واقع شده است (شکل ۱). از لحاظ جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بین طول جغرافیایی  $53^{\circ} 04' 57''$  -  $53^{\circ} 18' 26''$  و عرض جغرافیایی  $36^{\circ} 09' 17''$  -  $36^{\circ} 29' 49''$  واقع شده است. میانگین سالانه دما حدود ۱۵ درجه سلسیوس با آب‌وهوای گرم و مرطوب و ارتفاع متوسط بارش ۸۲۲ میلی متر در سال است. توپوگرافی محلی از ارتفاع ۲۶- متر تا ۳۶۷۰ متر متغیر است.

### داده‌های مورد استفاده در مدل SWAT

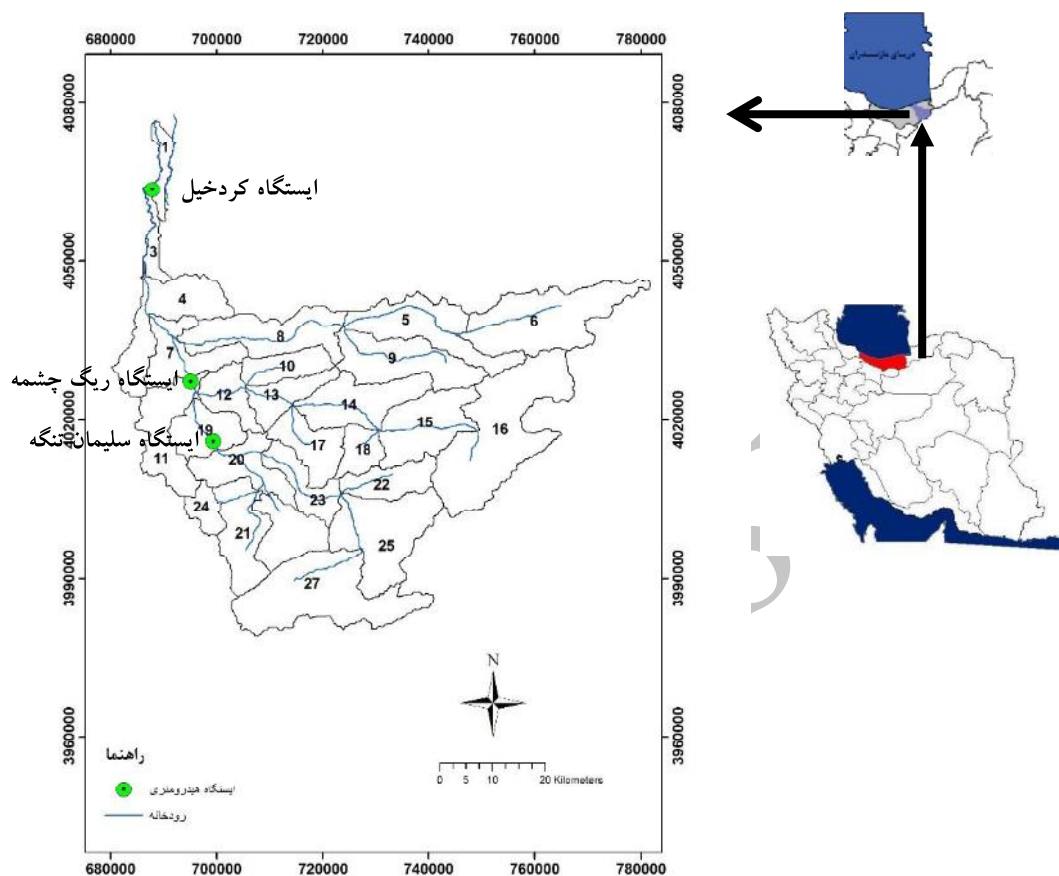
لایه‌های رقمی مورد استفاده. نقشه‌های اصلی مورد نیاز به منظور پیکربندی حوضه آبخیز تجن در مدل SWAT شامل نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و مدل رقمی ارتفاعی است. برای لایه رقمی کاربری اراضی، نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۰ با استفاده از تفسیر تصاویر ماهواره ای لندست ۵ و استفاده از اطلاعات میدانی (۳) در سطح حوضه آبخیز اصلاح و استفاده شده است. نقشه خاک سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) استفاده شد.

داده‌های اقلیمی و هیدرومتری. برای معرفی شرایط اقلیمی حوضه به مدلی نیاز است که با معرفی ایستگاه‌های حوضه متغیرهای بارندگی، دمای کمپنه و دمای بیشینه در مقیاس روزانه به مدل معرفی شود. اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و سینوپتیکی از سازمان هواشناسی کشور و باران‌سنجی و تبخیرسنجی از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران اخذ شد. داده‌های مربوط به پارامترهای فسفات و دبی سه ایستگاه هیدرومتری کردخیل، ریگ چشمه و سلیمان‌تنگه از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران گردآوری شد.

کیفی در مقیاس حوضه‌ای را داراست. همچنین با حضور آلاینده‌های غیرنقطه‌ای بی‌شک مشکلاتی برای اغلب حوضه‌های آبخیز ایران رقم می‌خورد، ولی به دلیل نبود ابزارهای اساسی مانند شبکه پایشی به ندرت مستند می‌شود. از این رو، استفاده از مدل‌هایی برای توصیف و تعیین کمیت انتقال مواد مغذی از کاربری‌های مختلف به‌ویژه کشاورزی به محیط‌های آبی ضروری است.

بنابراین، هدف اصلی این مطالعه تعیین تأثیر الگوی کاربری اراضی و مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال فسفات در حوضه‌ای کشاورزی با غالبیت کشت برنج است. همچنین، کشت برنج در این حوضه با توجه به شرایط کشت متفاوت و غرقابی، شرایط هیدرولوژیکی متفاوتی ایجاد می‌کند. همچنین، تأثیر ویژه‌ای بر عرضه مواد مغذی و کودها بر منابع آبی ایجاد می‌کند. این ویژگی شالیزارها شبیه‌سازی بار فسفات و انتقال آن را مشکل‌تر می‌سازد. مدل SWAT مدل مناسبی برای شبیه‌سازی سیستم‌های با محیط شالیزاری و ارتباطش با کاربری اراضی و نحوه تأثیر مؤلفه‌های مختلف در انتقال فسفات در حوضه است. بنابراین، شبیه‌سازی تغییرات طولانی‌مدت بار فسفات در حوزه رودخانه تجن، درک ارتباط تأثیر کاربری‌ها بر بار فسفات رودخانه تجن و نیز ارزیابی سهم مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال فسفات در منطقه مورد مطالعه با مدل SWAT صورت پذیرفت. همچنین، به منظور ارزیابی روش شناسی، حوزه رودخانه تجن، یکی از رودخانه‌های مهم کشور، به علت دارا بودن تغییرات نسبتاً شدید کاربری اراضی طی دهه‌های اخیر و نیز استفاده وسیع از کودهای نیترا ت و فسفات در زمین‌های کشاورزی، به‌ویژه شالیزارها، انتخاب شد که به دریای خزر وارد می‌شود.

## مدیریت آب و آبیاری



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز تجن در کشور و زیرحوضه‌ها

محلی و مسئولان آب و فاضلاب شهری و روستایی و نظایر آن تخمینی از بار آلودگی فسفات این مراکز جمعیتی به‌دست آمد.

### پیکره‌بندی و ورود اطلاعات به مدل

پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات حوضه و تهیه فایل‌های ورودی، کار اولیه برای اجرای مدل شروع شد. شبکه آبراهه، مرز حوضه و زیرحوضه‌ها بر اساس نقشه رقومی ارتفاعی تهیه شد. برای معرفی نقشه خاک نیاز است تا اطلاعات توصیفی هر واحد به بانک داده مدل معرفی

اطلاعات مدیریتی. اطلاعات مدیریتی مربوط به دامپروری سنتی و کشاورزی در قسمت مدیریت مدل اعمال شد. ورودی‌های کلیدی مربوط به مدیریت محصولات کشاورزی در مدل عبارت بود از کاشت، شخم، برداشت، برنامه چرا، کود شیمیایی و کود حیوانی که از سازمان جهاد کشاورزی و بازدید میدانی حاصل شد. شبیه‌سازی آلودگی ناشی از دامداری سنتی با توجه به تعداد و نوع دام‌های موجود محاسبه شد.

منابع آلاینده حوضه. با مطالعات میدانی از روستاها و شهرهای قرارگرفته در مسیر رودخانه‌ها، مصاحبه با مردم

## مدیریت آب و آبیاری

برای ارزیابی نكویی برازش مدل از دو تابع هدف ضریب تعیین<sup>۳</sup> ( $R^2$ ) و نش ساتکلیف<sup>۴</sup> (NS) استفاده شد (۴، ۷).

## نتایج و بحث

### واسنجی و اعتبارسنجی در مدل SWAT CUP

با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، حوضه به ۲۶ زیرحوضه تقسیم شد. همچنین، با توجه به لایه‌های کاربری اراضی، خاک و شیب حوضه به ۴۰۷ واحد پاسخ هیدرولوژیکی حاصل شد. واسنجی و اعتبارسنجی در نرم‌افزار (نسخه ۵.۱) SWAT-CUP<sup>۲۰۱۲</sup> انجام شد. بدین‌منظور در مرحله نخست، با انتخاب پارامترهای مؤثر آنالیز حساسیت مدل انجام شد. نتیجه آنالیز حساسیت معرفی تعداد پارامتر حساس برای واسنجی مدل بود. تعداد هجده پارامتر با بیشترین تأثیر روی دبی ورودی و کیفیت آب مشخص شد. با توجه به متنوع بودن کاربری‌های موجود در حوضه آبخیز، مقدار پارامتر شماره منحنی و حداکثر ذخیره تاج پوشش به صورت مجزا برای تمامی کاربری‌ها محاسبه شد. مقدار این پارامترها پس از متوسط‌گیری در کل کاربری‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در جدول ۱ محدوده اولیه و بهینه هر پارامتر ارائه شده است.

نتایج آماری حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل به صورت ماهانه با استفاده از آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین و نش ساتکلیف در جدول ۲ خلاصه شده است. همچنین، در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ منحنی مربوط به داده‌های مشاهده‌ای و بهترین شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی متغیر فسفات در سه ایستگاه ارائه شده است.

شود. نقشه کاربری اراضی نیز که در هشت کلاس مختلف تهیه شده بود، بر اساس راهنمای مدل، کد مربوط به هر کاربری مشخص شد. از تلفیق نقشه‌های ذکرشده واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه ایجاد شد. سپس، در بخش ورود داده‌های اقلیمی با توجه به اینکه مدل SWAT در مقیاس زمانی روزانه شبیه‌سازی انجام می‌دهد، داده‌های روزانه ایستگاه‌ها به مدل معرفی شد. همچنین، در ادامه داده‌های مدیریت کشاورزی نیز برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی استفاده شد (۱۸).

### واسنجی و اعتبارسنجی در مدل SWAT CUP

واسنجی مدل در سه ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه، ریگ‌چشمه و کردخیل در نرم‌افزار SWAT-CUP<sup>۱</sup> الگوریتم SUFI2<sup>۲</sup> صورت پذیرفت. مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت فسفات ( $PO_4^{3-}$ ) در دوره زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ (تعداد ۶۶ داده) در سه ایستگاه هیدرومتری سلیمان‌تنگه، ریگ‌چشمه و کردخیل (شکل ۱) با فاصله زمانی یک ماهه (تقریباً یک نمونه در هر ماه) در وزارت نیرو نمونه برداری شد. در این مطالعه واسنجی ماهانه فسفات در دوره آماری بین آوریل ۲۰۰۹ تا آوریل ۲۰۱۳ و صحت‌سنجی مدل در دوره آماری بین می ۲۰۱۳ تا سپتامبر ۲۰۱۴ در سه ایستگاه ذکرشده انجام شد. بار فسفات هر ایستگاه با توجه به غلظت فسفات و دبی هر ایستگاه هیدرومتری به دست آمد. آنالیز حساسیت مدل برای انتخاب پارامترهای حساس در واسنجی نیز با استفاده از روش One-At-A-Time انجام گرفت. به منظور واسنجی مدل، هجده پارامتر اصلی مؤثر بر رواناب و فسفات بعد از حساسیت‌سنجی انتخاب شد.

3. Coefficient of Determination  
4. Nash Sutcliffe

1. SWAT Calibration and Uncertainty Programs  
2. Sequential Uncertainty Fitting

جدول ۱. دامنه اولیه و بهینه پارامترهای منتخب مدل SWAT

محدوده بهینه	محدوده اولیه	تعریف پارامتر	پارامتر
۰/۰۵-۱	۰/۰۵-۱۰	میزان کربن آلی	SOL_CBN (Organic carbon content)
۰/۱-۰/۴	۰-۱	ظرفیت آب در دسترس خاک	SOL_AWC (Available water capacity of the soil layer)
۰/۱-۰/۳	۰-۱	عامل اقدامات حفاظتی در USLE	USLE_P (USLE equation support pra)
۶۰-۷۵	۳۵-۹۸	عدد منحنی رواناب	CN2 (SCS runoff curve number for moisture condition)
۵-۱۰	۰-۱۰۰	حداکثر ذخیره تاج پوشش	CANMX (Maximum canopy storage)
۰/۲-۰/۴	۰-۱	کارایی اختلاط بیولوژیکی	BIOMIX (Biological mixing efficient)
۰/۵-۰/۷	۰-۱	فاکتور جبران جذب گیاه	EPCO (Plant uptake compensation factor)
۰/۶-۰/۸	۰-۱	ضریب جبران تبخیر از خاک	ESCO (Outflow simulation option)
-۰/۰۷ ۰/۰۲	۰/۰۲-۰/۲	ضریب برگشت آب‌های زیرزمینی	GW_REVAP (Groundwater "revap" coefficient)
۵۰-۱۷۰	۰-۵۰۰	زمان تأخیر آب زیرزمینی (روز)	GW_DELAY (Groundwater delay)
۱۰۰-۱۵۰	۰-۵۰۰۰	عمق استانه آب در آبخوان عمیق	GWQMN (Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur)
-۵-۵	-۲۰-۲۰	دمای پایه ذوب برف (سلسیوس)	SMTMP (Snow melt base temperature )
۰/۵-۰/۹	۰/۰۱-۱	درصد تخلخل خاک	ANION_EXCL (Fraction of porosity from which anions are excluded)
۰/۵-۲	۰-۵	میزان غنی‌سازی فسفر آلی	ERORGP (Organic P enrichment ratio)
۰-۱۰	۰-۱۰۰۰	سهم غلظت فسفر محلول در آب زیرزمینی به فلو جریان از زیرحوضه (میلی‌گرم فسفر در لیتر) ضریب ثابت برای معدنی‌شدن فسفر آلی به	GWSOLP (Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to stream flow from sub basin)
۰/۴-۰/۶	۰/۰۱-۰/۷	فسفر حل‌شده در ریچ در دمای ۲۰ درجه سلسیوس	BC4 (Rate constant for decay of organic phosphorus to dissolved phosphorus)
-۰/۶-۰/۲	۰-۱	شیب متوسط HRU	HRU_SLP (Average slope steepness)
۱۰۰-۱۲۰	۱۰۰-۲۰۰	ضریب تفکیک خاک	PHOSKD (Phosphorus soil partitioning coefficient)

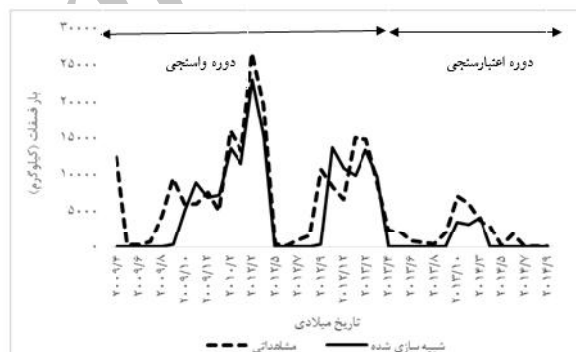
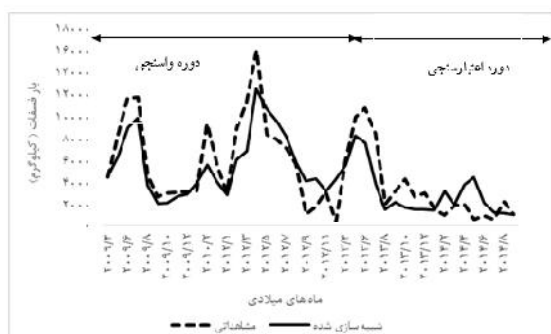
مدل‌سازی سهم مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال بار آلودگی فسفات در کاربری‌های کشاورزی، جنگل و مرتع با استفاده از مدل SWAT

جدول ۲. نتایج آماره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای مقادیر فسفات ماهانه در ایستگاه‌ها

ایستگاه	ایستگاه کردخیل	ایستگاه ریگ‌چشمه	ایستگاه سلیمان‌تنگه
آماره	دوره	دوره	دوره
	اعتبارسنجی	اعتبارسنجی	اعتبارسنجی
	(۲۰۱۳-۲۰۱۴)	(۲۰۱۳-۲۰۱۴)	(۲۰۱۳-۲۰۱۴)
	(۲۰۱۳)	(۲۰۱۳)	(۲۰۰۹)
R <sup>2</sup>	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۷۹
NS	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۶۰

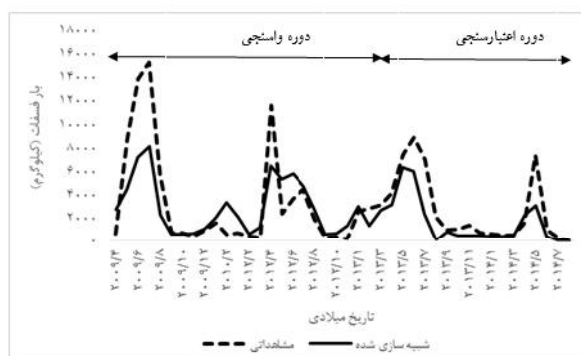
مختلف در مطالعات قبلی نیز اثبات شده است (۱۶، ۱۹). نتایج مقایسه روش‌های مختلف برای دستیابی به بهترین دامنه پارامترهای مدل نشان داد که واسنجی هم‌زمان سه ایستگاه بهترین ضرایب کارایی مدل را به همراه دارد. در مطالعات دیگر بین این دو روش اختلاف چندانی مشاهده نشد (۱۷، ۲۲).

نتایج آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین و نش ساتکلیف حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل در هر سه ایستگاه مورد بررسی تأیید شد (۱۵). این شرایط نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی فسفات در حوضه آبخیز تجن است. توانایی مدل در شبیه‌سازی فسفات در حوضه‌های با ابعاد



شکل ۳. بار فسفات شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه ریگ‌چشمه

شکل ۲. بار فسفات شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه سلیمان‌تنگه

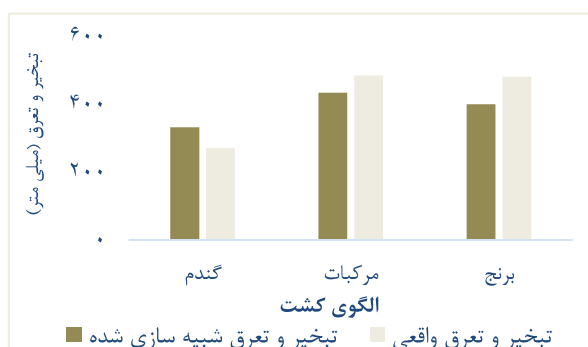


شکل ۴. بار فسفات شبیه‌سازی و مشاهداتی در دوره واسنجی و اعتبارسنجی ایستگاه کردخیل

## مدیریت آب و آبیاری

دوره ۶ ■ شماره ۲ ■ پاییز و زمستان ۱۳۹۵

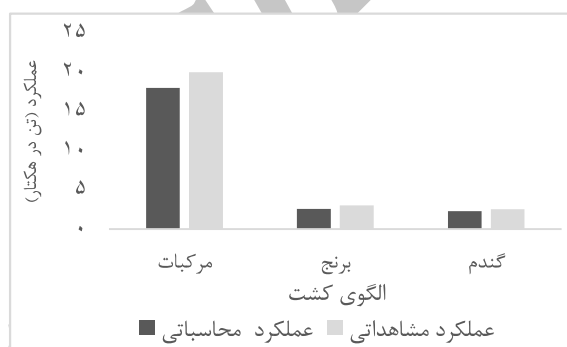
آن‌ها واسنجی شد. برای واسنجی محصولات در این بخش برخی پارامترهای گیاهی در پایگاه داده‌های مدل SWAT بررسی شد (۱۸). در این تحقیق، این مقادیر متناسب با منطقه مطالعاتی و نوع محصول، پس از اجراهای مختلف مدل و مقایسه مقادیر عملکرد و تبخیر و تعرق شبیه‌سازی و مشاهداتی در منطقه اصلاح شد. در شکل ۵ نتایج نهایی و مربوط به عملکرد محصولات مختلف در حوضه آبخیز تجن در مقابل عملکرد مشاهداتی نمایش داده شده است.



شکل ۶. مقادیر تبخیر و تعرق شبیه‌سازی شده با مقادیر تبخیر و تعرق حداکثر گزارش شده از سند ملی آب

## واسنجی تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد محصولات کشاورزی

شبیه‌سازی عملکرد محصولات کشاورزی از جمله مواردی بود که در این مطالعه به آن پرداخته شد. در این راستا محصولات عمده در منطقه مطالعاتی شامل گندم، محصولات باغی و شالیزار در قسمت تعریف واحد پاسخ هیدرولوژیکی الگوی کشت غالب در منطقه و اطلاعات مربوط به مدیریت زراعی آن‌ها در بخش اطلاعات مدیریتی به مدل معرفی و مقادیر عملکرد و تبخیر و تعرق واقعی



شکل ۵. عملکرد محاسباتی و مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه

## ارتباط آلودگی فسفات با انواع کاربری اراضی و

### بررسی تأثیر مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال

نتایج مدل واسنجی شده نشان داد بار سالانه فسفات از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳ از حدود ۲۹۰۰۰ تا ۱۰۲۹۰۰ کیلوگرم در خروجی حوضه آبخیز متفاوت است. سال ۲۰۱۲ بیشترین بار فسفات را داشت. وقوع این امر ممکن است به دلیل افزایش رواناب خروجی از این حوضه در این سال باشد. با محاسبه مقادیر متوسط ماهانه بار فسفات در دوره شبیه‌سازی به تفکیک هر کاربری و سپس برآورد سهم هر کاربری نسبت به کاربری‌های دیگر، الگوی تغییرات ماهانه فسفات در هر کاربری به‌دست آمد (شکل ۷). نتایج نشان

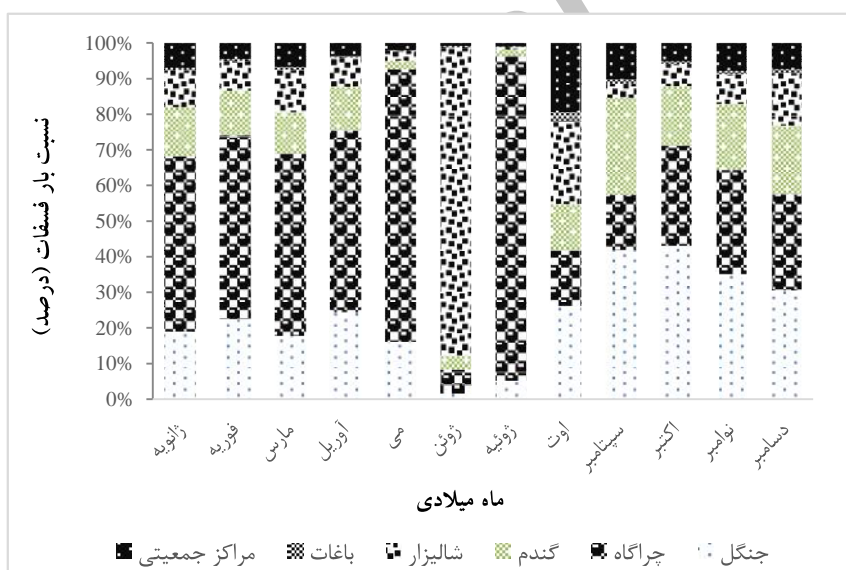
با توجه به کمبود داده‌های لیسیمتری<sup>۱</sup> در منطقه، مقادیر تبخیر و تعرق حداکثر گزارش شده از سند ملی آب در محدوده مورد مطالعه، برای هر یک از محصولات در سال‌های پربارش مبنای مقایسه و واسنجی مدل قرار گرفت. در شکل ۶ مقادیر شبیه‌سازی در مقابل مقادیر گزارش شده سند ملی آب نمایش داده شده است. نتایج این شکل حاکی از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی بود.

1. lysimeter data



بار آلودگی فسفات از این کاربری شده است. زمین‌های کشاورزی ۱۹/۵ درصد از منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شود، در حالی که ۲۴/۷ از بار فسفات از این کاربری ناشی می‌شود که ممکن است از مصرف کودهای شیمیایی و حیوانی در کاربری کشاورزی طبیعی حاصل شده باشد (۲۰). همچنین، مقدار بار فسفات تولیدشده در انواع محصولات متفاوت است. گندم دیم، برنج و باغات محصولات اصلی کشت در این منطقه است. گندم دیم ۱۴/۷ درصد بار فسفات را سبب شده است، درحالی که حدود ۵۰ درصد از مساحت کاربری کشاورزی به این محصول اختصاص دارد.

داد زمین‌های جنگل، ۵۴ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شود و ۲۴ درصد از بار فسفات حوضه آبخیز سهم این کاربری است. سهم بالای کاربری جنگل به دلیل سهم بیشتر در مساحت کل حوضه بوده و نسبت به مساحت خود بار آلودگی کمتری نسبت به دیگر کاربری‌ها ایجاد کرده است. از طرف دیگر، مراتع ۲۴ درصد از کل مساحت حوضه و ۴۴/۸ درصد از بار فسفات حوضه آبخیز را سهمیم است. سهم بالای آلودگی فسفات ممکن است به دلیل چرای زیاد در مراتع و در نتیجه تجمع کودهای دامی باشد. از طرف دیگر، چرای بیش از ظرفیت زیست‌بوم به دنبال خود افزایش فرسایش و رواناب، نیتروژن، فسفر و پتاسیم را به همراه دارد (۶). در نتیجه، عوامل ذکر شده سبب افزایش



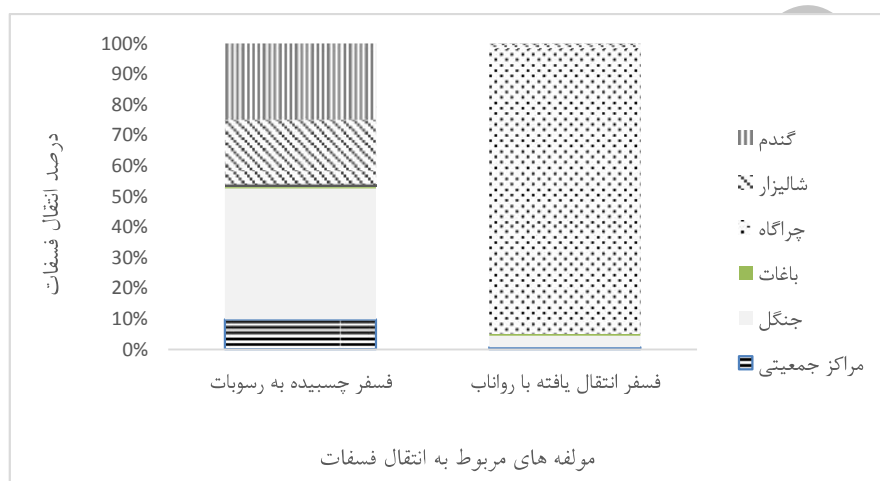
شکل ۷. الگوی میانگین بار فسفات ماهانه خروجی از کاربری‌های مختلف طی دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴

حوضه آبخیز را شامل می‌شود، در حالی که ۵/۵ درصد بار فسفات را تولید می‌کند. افزایش بار فسفات با توجه به مصرف شوینده‌ها در مراکز جمعیتی توجیه‌پذیر است. در تأیید این مسئله، مطالعاتی گزارش کرده‌اند که کاربری شهری و کشاورزی در کاهش کیفیت آب در سیستم‌های

شالیزارها ۴/۵ درصد از مساحت منطقه و ۹/۳ درصد بار فسفات را سبب می‌شود. کشت متفاوت محصول برنج نسبت به دیگر کشت‌ها، استفاده از مقدار کود فراوان و دوره طولانی کشت غرقابی، سبب شده مواد مغذی محلول به راحتی از دست برود. مناطق جمعیتی ۱/۳ درصد از

خاک، قابلیت انحلال کم است. همچنین، رسی بودن اغلب خاک‌های منطقه، به همراه ارش و عملیات آبیاری سبب شده است فسفر به ذرات خاک بچسبد و با رسوب منتقل شود. از طرفی، دلیل انتقال فسفات با رواناب در مراتع را می‌توان تراکم ناشی از چرای دام در مرتع با پوشش گیاهی ضعیف دانست.

آبی مجاور، تغییر شرایط سطح خاک، افزایش سطح غیرقابل نفوذ و تولید آلودگی نقش مهمی دارد (۸، ۱۳، ۱۴، ۲۱). همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در همه کاربری‌ها، به جز کاربری مرتع، سازوکار اصلی انتقال فسفر حمل از طریق رسوبات بوده است. در مزارع کشت آبی و دیم با توجه به تزریق کودهای فسفاتی در لایه‌های سطحی



شکل ۸. درصد مؤلفه‌های مربوط به تلفات فسفات

آلودگی در سطح حوضه آبخیز، پس از شبیه‌سازی فسفات در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴، بار فسفات (کیلوگرم بر کیلومترمربع) در خروجی هر زیرحوضه محاسبه شد. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، متوسط بار سالانه فسفات از ۲۱۸ کیلوگرم در کیلومترمربع در زیرحوضه ۳ تا ۸ کیلوگرم در کیلومترمربع و در زیرحوضه ۱۰ متفاوت است. میزان بار فسفات در آب ممکن است متأثر از عوامل طبیعی یا فعالیت‌های انسانی باشد، به طوری که در دهه‌های اخیر استفاده از شوینده‌ها و مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی، فاضلاب‌های صنعتی و سرریز سیستم‌های سپتیک، حوضه‌های آبخیز را در معرض نفوذ بیش از حد مجاز مواد مغذی قرار داده است. زیرحوضه ۳

چرای بی‌رویه در مراتع باعث کاهش مواد آلی خاک، کاهش پوشش گیاهی و تراکم شدن سطح خاک شده است. در نتیجه سطح خاک را در معرض ضربه قطره‌های باران قرار می‌دهد که در نتیجه آن رواناب بیشتری تولید می‌شود که بار بیشتر فسفر محلول در رواناب مرتع را به همراه دارد (۲۰). در مطالعات پیشین نیز میزان انتقال فسفات در شالیزارها بیشتر به صورت چسبیده به ذرات و در جنگل‌ها و مراکز جمعیتی انتقال به صورت محلول بسیار کمتر و بیشتر به صورت فسفات آلی بوده است (۱۱، ۲۰).

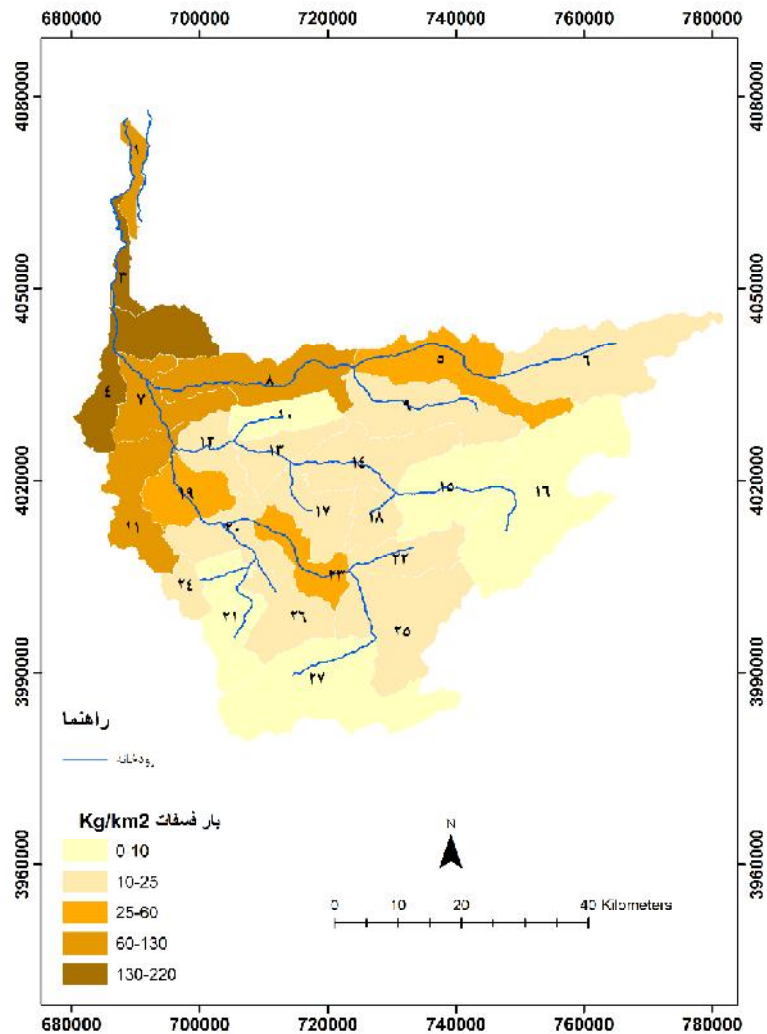
## مناطق بحرانی

به منظور تعیین مناطق بحرانی و نیز ارزیابی تغییرات مکانی

مدلسازی سهم مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال بار آلودگی فسفات در کاربری‌های کشاورزی، جنگل و مرتع با استفاده از مدل SWAT

۱، ۷ و ۱۱ غالبیت کاربری کشاورزی و نیز وجود حوضچه‌های پرورش ماهی در زیرحوضه‌ها را می‌توان دلیلی احتمالی بر بار بالای فسفات نام برد. بنابراین، این زیرحوضه‌ها باید از نظر مدیریت کیفیت آب در اولویت قرار گیرند.

و ۴، و پس از آن زیرحوضه‌های ۱، ۷، ۸ و ۱۱ بیشترین بار آلودگی را دارد. بار بالای فسفات در زیرحوضه‌های ۳، ۴ و ۸ ممکن است به دلیل غالبیت کاربری مسکونی باشد، به طوری که فعالیت‌های مربوط به شهرنشینی سبب افزایش نیتروژن و فسفر در آب‌های سطحی می‌شود. در زیرحوضه



شکل ۹. بار فسفات خروجی از زیرحوضه‌های آبخیز تجن

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

حفظ کیفیت آب، به‌ویژه در مناطق دارای محدودیت نسبی منابع آب، یکی از ارکان برنامه‌ریزی مطرح است. بنابراین، ضروری می‌نماید تا مطالعات دقیقی در مورد کیفیت منابع آب و عوامل آلوده‌کننده آن صورت پذیرد و از اقداماتی که سلامت منابع آبی را به‌خطر می‌اندازند جلوگیری به‌عمل آید. از طرفی، رودخانه‌تجن یکی از منابع عمده تأمین‌کننده آب برای مصارف شرب، آبیاری و محلی برای تخم‌ریزی گونه‌های مختلف ماهیان خاویاری و پولک‌دار است. از این‌رو، پایش مستمر کیفیت آب تجن برای رفع نگرانی از ورود آلودگی‌های مختلف بدان، یکی از وظایف کلیدی نهادهای نظارتی ذی‌ربط به‌حساب می‌آید. برای رسیدن به این هدف، باید به‌طور مستمر تحت نظارت و کنترل باشد تا بتوان با آگاهی از وجود هر گونه آلاینده‌های احتمالی در آب اقدامات کنترلی لازم را اعمال کرد. بنابراین، در این مطالعه تلاش شده است تأثیر کاربری‌های مختلف و مؤلفه‌های مؤثر بر انتقال فسفات در حوضه آبخیز تجن بررسی شود. در راستای نیل به این اهداف، نخست شبیه‌سازی جامع این حوضه با استفاده از مدل SWAT انجام گرفت و توانایی مدل در شبیه‌سازی فسفات تأیید شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، کاربری مرتع و شالیزار بیشترین سهم را در بار فسفات سهیم بود. همچنین، در همه کاربری‌ها، به‌جز کاربری مرتع، سازوکار اصلی انتقال فسفر حمل از طریق رسوبات بوده است که باید در انتخاب راهکارهای مدیریت در این مناطق به آن توجه داشت. در انتها نیز پیشنهاد می‌شود از چرای بیش از حد در مراتع جلوگیری به‌عمل آید و چرا بر اساس ظرفیت برد چراگاه‌ها صورت پذیرد. همچنین، مناطق حساس به فرسایش در منطقه شناسایی شود تا در اولویت حفاظتی برای کاهش بار آلودگی فسفات قرارگیرد. علاوه بر این موارد تلاش شود از ورود منابع آلاینده‌ای نقطه‌ای به داخل رودخانه ممانعت به‌عمل آید.

## منابع

1. اسماعیلی ساری، س. (۱۳۸۱) آلاینده‌ها، بهداشت و استاندارد در محیط‌زیست. انتشارات نقش مهر، ۷۶۷ ص.
2. ایمانی س. دلاور م. و نیک‌سخن م. (۱۳۹۴) تأثیر زمانی کاربری‌های مختلف بر کیفیت آب دریاچه زریبار. زمین‌شناسی ایران. ۳۶: ۴۲-۵۱.
3. سلمان ماهینی ع. فضلی ح. دریانبرد ر. کامیاب ح. فندرسکی ف. داور ل. آذرمدل ح. مهری ا. و خیرآبادی (۱۳۹۰) پهنه‌بندی و تعیین درجه حساسیت اکولوژیکی نواحی ساحلی. سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۲۳۱ ص.
4. جیرانی ف. (۱۳۸۸) شبیه‌سازی فرسایش، انتقال رسوب و راهکارهای حفاظتی در حوضه آبریز گاماسیاب با استفاده از مدل SWAT. دانشگاه تربیت مدرس. تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
5. کارآموز م. احمدی آ. و طاهریون م. (۱۳۸۸) ارزیابی اثرات بهترین راهکارهای مدیریتی در حوضه آبخیز بر بهره‌برداری کمی و کیفی از مخزن. علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۳ (۹): ۹-۱۶.
6. مومنی م. کلباسی م. جلالیان ا. و خادمی ح. (۱۳۸۷) اثر تغییر کاربری اراضی و چرای مفراط بر هدررفت برخی شکل‌های فسفر خاک در دو منطقه از زیرحوضه آبخیز ونک. علم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۴۶): ۵۹۵-۶۰۶.
7. Abbaspour K.C. Rouholahnejad E. Vaghefi S. Srinivasan R. and Yang H. (2015) Continental scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Hydrology. 524: 733-752.

## مدیریت آب و آبیاری

8. Bakr N. Weindorf D.C. Bahnassy M.H. Marei S.M. and El Badawi M. (2010) Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi temporal Landsat data. *Application geography*. 30: 592-605.
9. Ballantine D. Walling D.E. and Leeks G.J. (2009) Mobilization and transport of sediment-associated phosphorus by surface runoff. *Water, Air and Soil Pollution*. 196: 311-320.
10. Chen C.W. Ju Y. Chen C.F. and Dong C. (2016) Evaluation of organic pollution and eutrophication status of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 113: 318-324.
11. Glavan M. Pintar M. and Volk M. (2012) Land use change in a 200-year period and its effect on blue and green water flow in two Slovenian Mediterranean catchments lessons for the future. *Hydrological Processes*. 27(26): 3964-3980.
12. Hao F. Zhang X. Wang X. and Ouyang W. (2012) Assesment the Relationship between Landscape Patterns and Nonpoint Source Pollution in the Danjiankou Reservoir Basin in China. *The American Water Resources Association*. 43: 1-16.
13. Kieken H. Lebonvallet S. Ledoux E. Mary B. Mignolet C. Poux X. and Sauboua E. (2013) Assessing the relationship between water quality parameters and changes in landuse patterns in the Upper Manyame River, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*. 52: 130-146.
14. Lamba J. Anita M. Thompson K.G. Karthikeyan J. and Panuska L.W. (2016) Good Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model. *International Sediment Research*.
15. Moriasi D.N. Arnold J.G. et al. (2007) Model evaluation guideline for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *T. American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(3): 885-900.
16. Mittelstet A.R. Storm D.E. White M.J. (2016) Using SWAT to enhance watershed-based plans to meet numeric water quality standards. *Sustainability of Water Quality and Ecology*. 7: 5-21.
17. Natha S.B. Allan J.D. Dolan D.M. Han H. and Richards R.P. (2011) Application of the soil and water assessment tool for six watersheds of Lake Erie: Model parameterization and calibration. *Great Lakes Research*. 37(2): 263-271.
18. Neitsch S.L. Arnold J.G. et al. (2002) Soil and water assessment tool, theoretical documentation version 2000. *Texas Water Mathematical Models of Watershe Hydrology, Water Resources Publication, Littleton. Colorado*. 405p.
19. Shrestha M.K. Recknagel F. Frizenscha J. and Meyer Y. (2016) Assessing SWAT models based on single and multisite calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semi arid on kaparinga catchment in South Australia. *Agricultural Water Management*.
20. Somura H. Takeda I. Arnold J.G. Mori Y. Jeong J. Kannan N. and Hoffman D. (2012) Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin, Japan. *Hydrology*. 450-451(5): 25-35.
21. Wan R. Cai S. Li H. Yang G. Li Z. and Nie X. (2014) Inferring land use and land cover impact on stream water quality using a Bayesian hierarchical modeling approach in the Xitiaoqi River Watershed, China. *Environmental Management*. 133(2): 1-11.

22. Yongwei G. Zhenyao S. Ruimin L. Qian H. and Xing W. (2012) A comparison of single-and multi-gauge based calibrations for hydrological

modeling of the Upper Daning River Watershed in China's Three Gorges Reservoir Region. Hydrology Research. 43(6): 822-832.

Archive of SID