سال نهم، شماره سی و ششم، زمستان ۱۳۹۴، صفحات ۱۲-۱

ارزیابـــی و برآورد بارهای غیر نقطـــه‌ای نیتروژن و فسفر با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد ایلام)

ابوالفضل بشیری [۱و*] و امین سارنگ [۲]

۱. کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۴/۴/۲۴

چکیده

تخمین بار آلودگی مواد مغذی تخلیه‌شـــده از حوضه آبریز به مخزن یک ســـد یکی از مسائل مهم در مدیریت تغذیه‌گرایی مخزن می‌باشد. در این راستا تدوین مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز با در نظر گرفتن خصوصیات حوضه نظیر شیب، جنس خاک، کاربری اراضی و توجه به متغیرهای هواشناسی ابزار مؤثری در تخمین بار آلودگی ورودی به مخزن سد در زمان‌های مختلف محسوب می‌شود. بدین منظور با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه منابع آلاینده موجود در سه زیرحوضه اصلی حوضه آبریز سد ایلام، سه نوع از منابع آلاینده که بیشترین نقش را در آلودگی حوضه و مخزن سد از نظر مواد مغذی ایفا می‌کنند توسط مدل " ابزار ارزیابی آب و خاک" (SWAT) شبیه‌سازی گردید و بار مواد مغذی در نقطه ورودی به مخزن برآورد شد. این منابع آلاینده شامل آلودگی ناشی از مصرف کود شیمیایی مورد استفاده کشاورزان، آلودگی مربوط به فعالیت‌های دامداری و مرغداری و آلودگی ناشی از دام‌های سنتی در حوضه می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل SWAT در شبیه‌سازی مواد مغذی در این حوضه آبریز عملکرد رضایت بخشی داشته است. مقایسه بار آلودگی سه زیر حوضه نشان می‌دهد که زیرحوضه گل‌گل بیشترین مقدار بار نیتروژن (۱۳۶/۲تن در ســـال) و فسفر (۱۹/۸ تن در ســـال) را دارد. همچنین بیشترین سهم را در بین منابع آلاینده برای تولید نیتروژن، کود حیوانی و برای تولید فسفر، کود شیمیایی دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: منابع غیر نقطه‌ای، حوضه آبریز، نیتروژن، فسفر، مدل SWAT.

مقدمه

رویکرد حوضه‌ای در مدیریت کیفی منابع آب یک فرآیند تصمیم‌گیری اســـت که نشان‌دهنده اســـتراتژی‌های کلی در جمـــع‌آوری و تحلیل اطلاعـــات به همـــراه درک عمومی از نقش‌ها، اولویت‌ها و مســـئولیت‌های همه ذی‌نفعان در یک حوضه آبریز می‌باشد. این رویکرد بر مبنای این مفهوم است که بهترین راه‌حل بسیاری از مشکلات کیفیت آب نظیر تجمع

*نویسنده مرتبط: ab_bashiri@ut.ac.ir

آلاینده‌ها و آلودگی‌ها بررسی آن‌ها در سطح حوضه آبریز است (طاهریون،۱۳۸۹). غنی‌سازی آب توسط مواد مغذی که رشد سریع جلبک و بسیاری از گیاهان آبزی را تقویت کرده و متعاقباً یک اختلال نامطلوب در تعادل ارگانیزم‌ها و کیفیت آب به وجود می‌آورند را تغذیه‌گرایی می‌نامند. به‌عبارت‌دیگر، ورود مواد مغذی به‌ویژه فسفر و نیتروژن به محیط‌های آبی موجب افزایش بیش‌ازحد جلبک‌ها و پدیده تغذیه‌گرایی که از مهم‌ترین پدیده‌های تأثیرگذار در کیفیت آب است، می‌گردد و افزون بر مشکلات کیفیت آب برای مصرف‌کننده، حیات سایر آبزیان را تهدید می‌کند. چهار فاکتور اصلی در پدیده تغذیه‌گرایی شامل نیتروژن، فسفر، نور خورشید و گازکربنیک می‌باشند. عدم نبود هر یک باعث محدود شدن پدیده تغذیه‌گرایی می‌شود و رشد جلبک‌ها را محدود می‌کند. از میان این عوامل، دو ماده نیتروژن و فسفر به سبب حضور در محیط آبی اهمیت بیشتری داشته و لذا از آن‌ها به‌عنوان مواد مغذی یاد می‌شود (Chapra،1997). گرچه مباحث مربوط به مدیریت کیفی آب در حوضه آبریز در کشور ایران از لحاظ اجرایی تا حد بسیار زیادی مغفول مانده و درنتیجه بسیاری از سدهای احداث‌شده در کشور درگیر پدیده تغذیه‌گرایی یا در آستانه آن می‌باشند، اما مباحث و مطالعات نظری و اجرایی این موضوع دهه‌های بسیاری است که در دنیا انجام‌گرفته و در حال رشد و گسترش می‌باشد که یکی از این موارد استفاده از رویکرد حوضه‌ای در مدیریت کیفی منابع آب و استفاده از مدل SWAT است.

مدل SWAT یک مدل جامع در زمینه مطالعات آب و خاک است که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان برای اراضی وسیع مورد استفاده قرار گیرد. مطالعه انجام شده برای کل ایران و مطالعه صورت گرفته برای کل آفریقا این مطلب را تأیید می‌کند (Faramarzi et al., 2009; Schul et al., 2008). همچنین به‌منظور پیش‌بینی جریان و بار مواد مغذی در حوضه‌ها با اندازه‌های مختلف از مدل SWAT استفاده‌شده است (Arnold et al.،1998). مدل SWAT به‌عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی اثرات درازمدت روش‌های مدیریتی متفاوت برای کاهش بار فسفر در مخزن کانونزویل شهر نیویورک توسط Shoemaker (2007) استفاده شد و مدل برای تعیین فسفر محلول، جریان آب و رسوب با استفاده از تصحیح تعدادی از روابط مدل، واسنجی و اعتبارسنجی گردید. برای شبیه‌سازی تمام فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی حوضه رودخانه تور، در شمال شرقی کشور سوئیس با مساحتی در حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع از مدل SWAT استفاده شد و نتایج مناسب و رضایت‌بخشی به دست آمد (Abbaspour et al.،2007). این مطالعه نتایج بسیار خوبی برای شبیه‌سازی رواناب و نیترات و نتایج نسبتاً مناسبی برای شبیه‌سازی دو هفته یک‌بار غلظت رسوب و کل فسفر داشت؛ با استفاده از مدل SWAT، منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای نیترات در یک مقیاس میانگین حوضه کوهستانی شبیه‌سازی‌شده و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی، مناسب ارزیابی شد (Pohlert et al., 2005). در ایران برای حوضه آبخیز رودخانه اهرچای در استان آذربایجان شرقی، مدل SWAT در تخمین بار نیتروژن و فسفر حوضه آبخیز به‌کاررفته و نتایج آن را با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های تجربی مورد مقایسه و تحلیل قرار دادند که نتایج به‌دست‌آمده کار آیی مدل SWAT را در شبیه‌سازی مواد مغذی نشان داد (Karamouz et al., 2008). به‌منظور ارزیابی اثرات درازمدت اجرای سیاست‌های مختلف بر جریان رودخانه، تولید رسوب و بار آلودگی منابع غیرنقطه‌ای در شهر باژونگ در استان سیچوان واقع در حوضه رودخانه یانگ‌تسه که از نظر آلودگی در شرایط وخیمی می‌باشد؛ مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت و نتایج مطالعه، کاهش درصد جریان آب، رسوب، نیتروژن و فسفر آلی را در سطح حوضه نشان داد (Ouyang et al., 2009). همچنین این تحقیق استفاده از مدل SWAT در ارزیابی تأثیر تبدیل کاربری اراضی در حوضه‌های بزرگ را تأیید کرد.(2008) .Karamouz et al در ایران و در مخزن سد ستارخان در آذربایجان شرقی از مدل SWAT جهت تعیین میزان بار آلودگی فسفر کل ورودی به مخزن استفاده کرده‌اند و اثر این بار توسط مدل چاپرا در مخزن شبیه‌سازی‌شده است؛ نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل تعریف‌شده حوضه و مخزن در تعیین سیاست‌های کنترلی بار آلودگی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.Saleh and

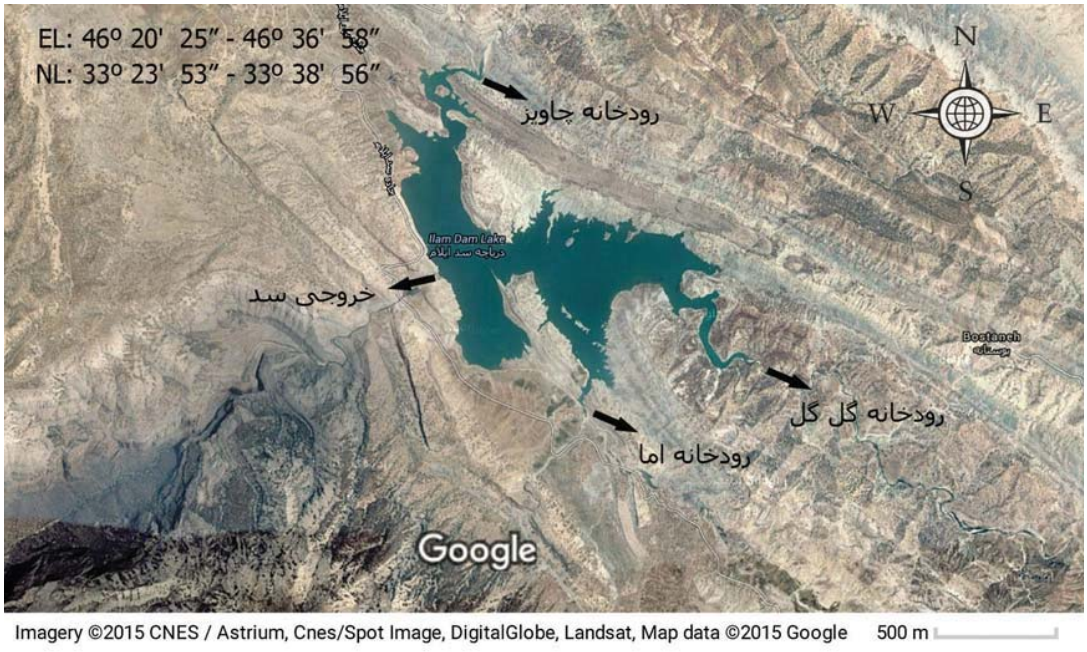
Du (2004) به‌منظـور ارزیابی دو مدل با مقیاس حوضه‌ای SWAT و HSPF در نرم‌افـزار BASINS 3.0، مطالعاتـی را در حوضه رودخانه بوسـک شمالی[1] در مرکز تگزاس انجام دادند؛ جریان متوسـط روزانه، رسـوب و بار مواد مغذی در مدل SWAT در هر دو مورد واسـنجی و صحت‌سنجی به مقادیر اندازه‌گیری شـده نزدیک‌تر بـود. به‌طورکلی می‌توان گفت که SWAT در هر دو مورد واسـنجی و صحت سنجی مقادیر مواد مغذی را بهتر پیش‌بینی نمود.

از آنجاکه مخزن سـد ایلام به دلیل ورود مداوم فاضلاب روستاهای بالادست، فضولات حیوانی، زهاب‌های کشاورزی و شیرابه زباله، بهره‌برداری مخزن، فرسایش شدید در سطح حوضه و موارد متعدد دیگر در معرض خطرات زیست‌محیطی و بـروز مشـکلات کیفی آب قرار دارد، لـذا در این تحقیق، شبیه‌سـازی و تعیین بار آلودگی مواد مغذی در حوضه آبریز سـد ایلام که یکی از حوضه‌های آبریز بسـیار آلوده از جنبه مواد مغذی در ایران می‌باشد و همچنین تعیین سهم منابع آلاینده در سطح حوضه به‌عنوان اهداف اصلی تحقیق در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به‌منظور کمک به مدیران و مسـئولین محیط‌زیست و متولیان آب منطقه در جهت تصمیم‌گیری و رسیدن به اهداف آب پاک راهگشا خواهـد بود؛ چرا که حوضه مذکور به‌شـدت از لحاظ تولید بار مواد مغذی مستعد بوده و دارای منابع متعددی از انواع مختلف آلاینده‌های مغذی است.

مواد و روش‌ها

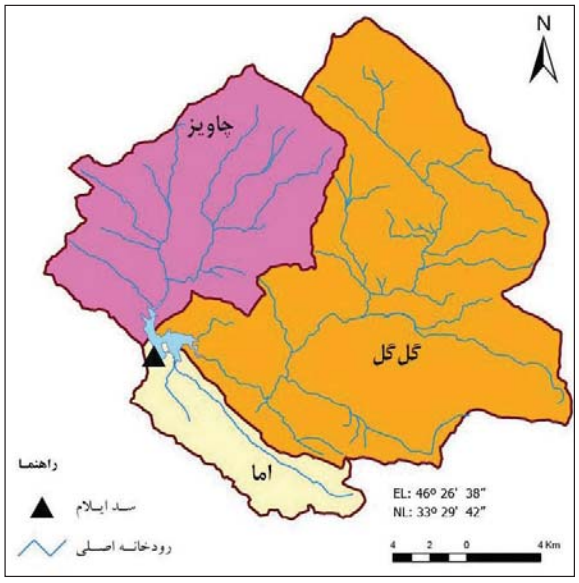
محدوده مطالعاتی

حوضه آبریز سـد ایلام در جنوب شرقی استان ایلام قرار دارد و از سـه زیرحوضه گل‌گل، چاویز و اما تشـکیل شـده است. این حوضه دارای مختصات جغرافیایی "۲۵ '۲۰ ° ۴۶ تا "۵۸ '۳۶ ° ۴۶ طول شرقی و "۵۳ '۲۳ °۳۳ تا "۵۶ '۳۸ ° ۳۳ عرض شمالی می‌باشد. سـد ایلام در ۲۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرسـتان ایلام و بر روی رودخانه کنجانچم (محل تلاقی سـه رودخانه گل‌گل، اما و چاویز) قرار دارد. شـکل ۱ تصویر ماهواره‌ای تهیه شـده از سـد ایلام و رودخانه‌های ورودی به آن را نشـان می‌دهد. شـکل ۲ نیز سه زیر حوضه اصلی سد ایلام را نشان می‌دهد.



شکل ۱. تصویر ماهواره‌ای سد ایلام و رودخانه‌های ورودی (بر گرفته از Google Map)

1. Upper north bosque



شکل ۲. زیر حوضه‌های اصلی حوضه آبریز سد ایلام

در ایـن تحقیق با اسـتفاده از مدل رقومـی ارتفاع[1] و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی[2] به بررسی ویژگی‌های حوضه پرداخته‌شده است. برای این منظور به کمک نرم‌افزار Arc GIS 9.3 خصوصیـات فیزیوگرافـی حوضـه از قبیل مسـاحت، ارتفاع متوسط از سطح دریا و شیب متوسط هر زیرحوضه استخراج گردید که در جدول ۱ ارائه‌شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیوگرافی حوضه سد ایلام

زیرحوضه	مساحت (کیلومترمربع)	ارتفاع متوسط از سطح دریا (متر)	شیب متوسط (درصد)	طبقه شیب غالب (درصد)	فراوانی طبقه شیب غالب (درصد)
چاویز	۱۴۰	۱۳۸۳	۳۰/۶	۲۰ تا ۴۰	۴۰/۲
گل‌گل	۲۸۷/۲	۱۵۷۸	۳۹/۵	۲۰ تا ۴۰	۴۵/۴
اما	۴۴/۴	۱۳۵۹	۳۲	۲۰ تا ۴۰	۴۳/۴

آمار و اطلاعات مورد اسـتفاده شامل داده‌های بارندگی و دما در ایسـتگاه سـینوپتیک ایلام، سـایر ایسـتگاه‌های اقلیم‌شناسـی ایلام، گلان، چناراشـی، ارکواز و داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب روزانه در سه ایستگاه گل‌گل، چاویز و اما می‌باشـد. این اطلاعات برای سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۰ جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفتند. مختصات جغرافیایی ایسـتگاه‌های هواشناسی و آب‌سـنجی به همراه طول دوره آماری اطلاعات مورد اسـتفاده آن‌ها در جدول ۲ ارائه‌شـده است.

اطلاعات کیفـی این تحقیق، از نتایج نمونه‌برداری‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده روی رودخانه‌های بالادست سد ایلام توسط شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس می‌باشد. جهت بررسـی تغییرات کیفی رودخانه‌ها در بالادسـت مخزن سد ایلام تعـداد ۱۹ نقطه نمونه‌بـرداری (۱۰ نقطه در زیرحوضه چاویـز، ۶ نقطه در زیرحوضه گل‌گل و ۳ نقطه در زیرحوضه اما) جهت نمونه‌برداری تعیین گردید.

1. DEM
2. GIS

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی در حوضه آبریز سد ایلام

نوع ایستگاه	نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول دوره آماری
هیدرومتری	چاویز	۱۰۶۷	۴۶ ۲۴ ۵۱	۳۳ ۳۰ ۵۲	۱۳۸۲-۱۳۸۹
	سرجوی	۱۱۰۰	۴۶ ۲۸ ۴۶	۳۳ ۲۷ ۵۶	۱۳۶۹-۱۳۸۹
	اما	۱۰۳۲	۴۶ ۲۵ ۱۷	۳۳ ۲۸ ۴	۱۳۸۲-۱۳۸۹
هواشناسی	ایلام	۱۳۳۷	۴۶ ۲۶	۳۳ ۳۸	۱۳۶۹-۱۳۸۹
	چنارباشی	۱۰۳۰	۴۶ ۴۲	۳۳ ۲۸	۱۳۶۹-۱۳۸۳
	گلان	۵۴۵	۴۶ ۱۵	۳۳ ۲۵	۱۳۷۵-۱۳۸۴
	ارکواز	۱۳۰۰	۴۶ ۳۵	۳۳ ۲۳	۱۳۶۹-۱۳۸۳

معرفی مدل SWAT

مدل SWAT مدلی جامع به‌منظور شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف درون حوضه می‌باشد و برای سازمان کشاورزی آمریکا توسعه داده‌شده است (Arnold et al., 1993). هدف اصلی از توسعه این مدل، پیش‌بینی اثر اقدامات مدیریتی بر روی میزان و کیفیت آب و رسوب در حوضه‌های بزرگ و پیچیده، با شرایط متنوع خاک و پوشش گیاهی در درازمدت است. این مدل به‌صورت اکستنشن Arc SWAT 2009 بر روی نرم‌افزار Arc GIS نصب و اجرا می‌شود. مدل SWAT بر مبنای شبیه‌سازی پیوسته با گام زمانی روزانه است که البته قابلیت کار با داده‌های ساعتی را نیز دارد. همچنین مدل دارای مبنای فیزیکی بوده و بیش از آن‌که نیاز به برقراری معادلات رگرسیون برای توضیح رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی باشد، به اطلاعات ویژه‌ای نظیر آب و هوا، خصوصیات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و راه‌کارهای مدیریت زمین در حوضه آبریز نیاز دارد. از مهم‌ترین مزایای استفاده از این رویکرد، توانایی آن در شبیه‌سازی حوضه‌های بدون ایستگاه اندازه‌گیری و بررسی پاسخ آن برای ورودی‌های جدید (تغییر در اقدامات مدیریتی حوضه، اقلیم، کاربری اراضی و غیره) است (Arnold et al., 1998). مدل SWAT به یک بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی برای اجرا نیاز دارد. درگذشته از نرم‌افزار Arc View بدین منظور استفاده می‌گردید اما در نسخه‌های جدیدتر SWAT، دو نرم‌افزار ARC GIS و Map Window مورد استفاده قرارگرفته‌اند. در این تحقیق از نسخه ARC SWAT 2009 استفاده‌شده است.

روش مدل‌سازی در SWAT

روش کار در این مدل به این صورت است که ابتدا حوضه آبریز به تعدادی زیر حوضه تفکیک می‌شود و سپس هر زیر حوضه به تعدادی بخش پاسخ هیدرولوژیکی[1] جزء بندی می‌گردد. هر بخش پاسخ هیدرولوژیکی از ترکیب نقشه‌های ارتفاعی رقومی، نقشه خاک‌شناسی و نقشه کاربری اراضی به دست می‌آید و کوچک‌ترین واحد کاری در SWAT می‌باشد. مدل با توجه به وزن نسبت داده‌شده توسط کاربر به سه عنصر شیب، کاربری اراضی و خاک‌شناسی، هر زیرحوضه را به بخش‌های کوچک‌تری به نام بخش پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم می‌نماید که در هر بخش پاسخ هیدرولوژیکی نقاط ازلحاظ شیب، کاربری اراضی و خاکشناسی شباهت بالایی به هم دارند. هر چه وزن ذکرشده بیشتر شود، این شباهت بیشتر شده و تعداد بخش پاسخ هیدرولوژیکی نیز بیشتر می‌شود و دقت در محاسبات مربوط به بار رسوب و رواناب نیز بالاتر می‌رود. پس از تشکیل بخش پاسخ هیدرولوژیکی‌ها، داده‌های هواشناسی وارد مدل گردیده و مدل به کمک این داده‌ها، رواناب و بار رسوب هر بخش پاسخ هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی می‌نماید. مدل پس از ثبت مقادیر خروجی بخش پاسخ هیدرولوژیکی‌های هر زیرحوضه، آن مقادیر را با هم جمع کرده و مقادیر خروجی هر زیر حوضه را مشخص می‌نماید.

1. HRU

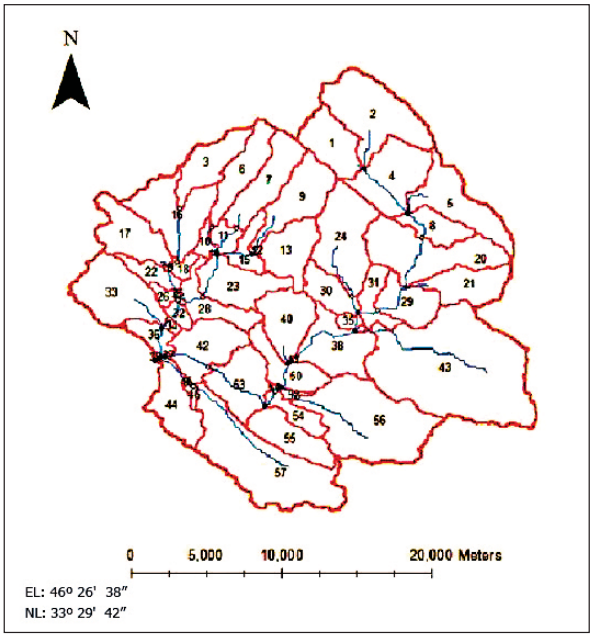
سپس با توجه به میانگین وزنی هر زیر حوضه با در نظر گرفتن پارامترهایی نظیر میزان فاصله با مخزن و خودپالایی رودخانه، مقادیر زیر حوضه‌ها با یکدیگر جمع گردیده و خروجی حوضه آبریز به دست می‌آید (Arnold et al., 1993).

الگوریتم SUFI-2

به‌منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر نتایج مدل SWAT، یک بسته نرم‌افزاری تحت عنوان SWAT-CUP توسط دکتر عباسپور توسعه داده شده است که این نرم‌افزار، واسنجی، صحت سنجی و تحلیل‌های عدم قطعیت و حساسیت را انجام می‌دهد. این نرم‌افزار روش‌های مختلفی را بدین منظور استفاده می‌نماید که در این تحقیق از روش SUFI-2 استفاده شده است (Abbaspour, 2009). روش SUFI برای پارامترهای مدل، حدود بزرگی را در نظر می‌گیرد تا تمام داده‌های مشاهده شده درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار گیرند، سپس محدوده مربوط به پارامترها را با لحاظ داشتن این شرط که متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین مقدار کوچکی باشد، تغییر می‌دهد (Abbaspour, 2009). الگوریتم بهینه‌سازی در روش SUFI به این صورت است که در گام نخست، یک تابع هدف تعریف می‌شود. در این روش می‌توان برای انجام واسنجی تابع هدف را یک متغیره (دبی جریان)، یا چند متغیره (دبی جریان، رسوب و مواد مغذی) معرفی کرد. گام بعد اختصاص محدوده مجاز برای هر پارامتر می‌باشد. در تعیین حدود اولیه بهتر است که آن‌ها تا حد امکان بزرگ و درعین‌حال معنی‌دار باشند. سپس با در نظر گرفتن حدود اولیه عدم قطعیت پارامترها، نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب به تعداد نسبتاً زیاد انجام می‌گردد. در هر بار نمونه‌گیری از حدود پارامترها، مقادیر انتخاب‌شده به مدل معرفی و اجرا می‌شود و متعاقباً مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد (Abbaspour, 2009; Talebizadeh et al., 2009).

اجرای مدل

به‌منظور ترسیم زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع، حد آستانه تعریف زیرحوضه برابر با ۹۰۰ هکتار در نظر گرفته شد. این مقدار حد آستانه تقریباً براساس مقدار پیشنهادی خود مدل SWAT انتخاب شد. همچنین حد آستانه طوری انتخاب گردید که سرشاخه‌های رودخانه‌های موجود در حوضه به‌خوبی ترسیم و شبیه‌سازی گردد. چراکه مقادیر بزرگ‌تر باعث حذف سرشاخه‌ها و مقادیر کوچک‌تر باعث تعدد زیرحوضه‌ها و افزایش غیرضروری محاسبات مدل و تطویل زمان شبیه‌سازی و واسنجی مدل می‌گردید. براساس موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی درنهایت ۵۷ زیرحوضه به دست آمد. شکل ۴ مرزهای حوضه، زیر حوضه‌ها و آبراهه‌های ترسیم‌شده توسط مدل را نشان می‌دهد. معرفی لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز برای تشکیل بخش پاسخ هیدرولوژیکی‌ها در مرحله بعدی مدل‌سازی انجام پذیرفت. نقشه کاربری اراضی به همراه مقادیر مخصوص به هر کاربری در مدل SWAT، نقشه خاک به همراه جداول مشخصات خاک‌ها و نقشه شیب ازجمله لایه‌های مورد استفاده در این مدل می‌باشند. جهت تشکیل واحدهای واکنش هیدرولوژیکی در مدل لازم است که با هم‌پوشانی سه لایه اطلاعاتی کاربری اراضی، خاک و شیب، واحدهای همگن مشخص گردند. هم‌پوشانی لایه‌ها و تشکیل واحدهای همگن می‌تواند با تقریب انجام شود و جهت جلوگیری از ازدیاد این واحدها، درصد آستانه‌ای برای هم‌پوشانی تعیین گردد. به این منظور درصدهای آستانه‌ای برای لایه‌های اطلاعاتی در حالت‌های متفاوت تعیین و تعداد بخش پاسخ هیدرولوژیکی‌ها برای هر حالت مشخص گردید. در پایان با اجرای مدل در حالت‌های مختلف، نتایج با تعداد ۲۲۲ بخش پاسخ هیدرولوژیکی به‌عنوان مدل نهایی مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۳. زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های شبیه‌سازی‌شده در مدل SWAT

منابع آلاینده واردشده به مدل

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه منابع آلاینده موجود در حوضه، سه نوع از منابع آلاینده که بیشترین نقش را در آلودگی حوضه و مخزن سد ایلام از نظر مواد مغذی ایفا می‌کنند، توسط مدل SWAT شبیه‌سازی گردید. این منابع آلاینده شامل آلودگی ناشی از مصرف کود شیمیایی مورد استفاده کشاورزان، آلودگی مربوط به فعالیت‌های دامداری، مرغداری و آلودگی ناشی از دام‌های سنتی در حوضه می‌باشد. در ادامه به‌منظور واردکردن آلودگی ناشی از فضولات دامداری‌ها، مرغداری‌ها که به‌صورت کود حیوانی به مصرف کشاورزی می‌رسد و همچنین سایر منابع آلاینده مانند کودهای شیمیایی مورد استفاده در کشاورزی، الگوی کشت براساس اطلاعات جهاد کشاورزی استان ایلام تهیه و همچنین میزان کود مصرفی هر محصول، تناوب غالب منطقه به دست آمد و به مدل وارد گردید. در حوضه مورد مطالعه، اغلب محصولات جو، گندم و ذرت به‌صورت آبی کشت می‌شوند. میزان و کود مصرفی هر یک از این محصولات از آمار جهاد کشاورزی استان ایلام استخراج گردید. همچنین تاریخ کشت و سایر عملیات کشاورزی مانند عملیات خاک‌ورزی، کوددهی و برداشت با توجه به اقلیم منطقه و نظر کارشناسان برآورد شد. در مورد کشت دیم که مساحت بیشتری از حوضه را نسبت به کشت آبی تشکیل می‌دهد، گندم، نخود و یونجه محصول غالب منطقه می‌باشد. کودهای شیمیایی مورد استفاده در این منطقه به چهار دسته کودهای ازته، فسفاته، پتاسه و حیوانی دسته‌بندی می‌گردند که با توجه به هدف تحقیق، شبیه‌سازی نیتروژن و فسفر، کود اوره به‌عنوان کود ازته، کود سوپر فسفات تریپل به‌عنوان کود فسفاته به مدل معرفی گردید. با توجه به مطالعات انجام‌شده فضولات گاوگوشتی، گاو شیری، گوسفند، مرغ تخم‌گذار و گوشتی به‌عنوان انواع ممکن کود دامی مورد استفاده در مزارع کشاورزی موجود در حوضه مطرح بودند. براساس نظرسنجی انجام‌شده، ۸۲ درصد دامداری‌ها و مرغداری‌ها فضولات خود را به‌عنوان کود در اختیار کشاورزان فعال در حوضه قرار می‌دادند و سایر کشاورزان فضولات دامی خود را به خارج از حوضه انتقال می‌دادند.

جدول ۳. انواع کودهای مورد استفاده در منطقه و میزان عناصر مختلف (بر حسب درصد)

نوع کود	کد شناسایی در مدل	نیتروژن غیر آلی	فسفر غیر آلی	نیتروژن آلی	فسفر آلی	NH_3-N/Min N
اوره	Urea	۰/۴۶	۰	۰	۰	۱
سوپر فسفات تریپل	۰۰-۴۵-۰۰	۰	۰/۲۴	۰	۰	۰
گاوگوشتی	DAIRY-FR	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۳۱	۰/۰۰۳	۰/۹۹
گاو شیری	BEEF-FR	۰/۰۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰	۰/۰۰۷	۰/۹۹
گوسفند	SHEEP-FR	۰/۰۱۴	۰/۰۰۳	۰/۰۲۴	۰/۰۰۵	۰/۹۹
مرغ تخم‌گذار	LAYER-FR	۰/۰۱۳	۰/۰۰۶	۰/۰۴	۰/۰۱۳	۰/۹۹
مرغ گوشتی	BROIL-FR	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۹۹

به‌منظور شبیه‌سازی آلودگی ناشی از فعالیت‌های دامداری سنتی در روستاهای موجود در منطقه با توجه به آمار موجود و همچنین نظرسنجی انجام‌شده، تعداد و نوع دام‌های موجود در هر روستا مشخص شد. هر گاو و گوسفند با وزن هزار کیلوگرم روزانه به ترتیب در حدود ۸۶ کیلوگرم و ۴۰ کیلوگرم فضولات تولید می‌کند (ASAE،1988). درصورتی‌که وزن هر گاو ۶۴۰ کیلوگرم و وزن هر گوسفند ۲۷ کیلوگرم در نظر گرفته شود، میزان فضولاتی که هر دام به‌صورت روزانه تولید می‌کند از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید.

$$\frac{1000}{40}=\frac{27}{x_s}\Rightarrow x_s=1.08 \qquad (۱$$

$$\frac{1000}{86}=\frac{640}{x_c}\Rightarrow x_c=55.04 \qquad (۲$$

از حاصل‌ضرب این مقادیر در تعداد دام، وزن فضولات کلی به‌دست آمد. با توجه به این‌که اغلب دام‌های سنتی از مراتع حوضه تغذیه می‌کنند و با فرض آن‌که کلیه فضولات در سطح مرتع پخش می‌گردد، می‌توان از تقسیم میزان کل فضولات بر مساحت مراتع حوضه میزان فضولات موجود در هر زیر حوضه را محاسبه کرد. به‌منظور واردکردن اطلاعات مربوط به چرای دام سنتی، تاریخ شروع چرا با توجه به اطلاعات موجود در منطقه، ۲۱ مارس معادل اولین روز بهار در نظر گرفته می‌شود که به مدت ۲۱۰ روز ادامه دارد.

جدول ۴. میزان فضولات تولیدی هر یک از انواع دام در واحد سطح حوضه در هر روز (کیلوگرم)

میزان فضولات	دام	
	گاو	گوسفند
میزان فضولات هر یک از انواع دام در کل حوضه	۶۹۰۳۰	۴۳۷۰۱
میزان کل فضولات ناشی از چرای دام سنتی	۱۱۲۷۳۱	
میزان فضولات موجود (کیلوگرم در هکتار در روز)	۴۰	

نتایج و بحث

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی رواناب، از طول کل دوره آماری ۲۴ ساله (سال ۱۹۸۷ تا سال ۲۰۱۰)، سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ برای واسنجی و ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ برای اعتبارسنجی رواناب و سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ برای اعتبارسنجی رسوب مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا، به‌منظور شبیه‌سازی بار مواد مغذی، از داده‌های مربوط به نیمه دوم سال ۲۰۰۹ به‌منظور واسنجی و نیمه اول سال ۲۰۱۰ به‌منظور اعتبارسنجی استفاده شد. واسنجی و اعتبارسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI قابل انجام است (Abbaspour et al., 2007). پارامترهای نهایی انتخاب‌شده برای واسنجی ایستگاه‌ها در جدول ۵ قابل‌مشاهده می‌باشد. این مقادیر با توجه به نتایج پیشنهادی مدل SWAT-CUP و هم‌چنین دامنه مجاز برای هر پارامتر تعیین‌شد. هم‌چنین برای ارزیابی مناسب و خوب برازش نتایج مدل، ضریب تبیین[1] و ضریب نش-ساتکلیف[2] انتخاب شدند.

1. R^2
2. E_{NS}

جدول ۵. نتایج واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل SWAT

پارامتر و نحوه تغییر آن در واسنجی مدل	توضیح	مقدار نهایی پارامتر		
		گل‌گل	چاویز	اما
v__CN2.mgt	ضریب SCS(شماره منحنی رواناب)	۶۹	۶۸	۶۸/۵
v__ALPHA_BF.gw	ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (day/1)	۰/۱۸۵۶	۰/۱۸۹۸	۰/۱۸۸۰
v__SOL_AWC().sol	ظرفیت آب قابل‌دسترس خاک (m/m)	۰/۰۷۷	۰/۳۸۰	۰/۰۵۵
v__GW_DELAY.gw	زمان رسیدن آب از آخرین لایه خاک به سفره آب زیرزمینی (day)	۱۴۳/۹	۳۹۷	۳۱۳
v__CH_K1.sub	هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه‌های فرعی (mm/h)	۴۸/۸۸	۵۰/۲	۷۵/۴
v__CANMX. بخش پاسخ هیدرولوژیکی	حداکثر ذخیره پوشش تاج گیاهی	۹/۵۷	۴۳	۴۰
v__ALPHA_BNK.rte	ضریب جریان پایه برای جریان‌های جانبی (day/1)	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۱۷۴
v__CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر کانال در کانال اصلی (mm/h)	۶۴/۸۳	۷۱/۹۵	۳۳/۲۹
v__SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (mm/h)	۸۳۶	۱۳۴۵	۱۹۰۶
v__ESCO. بخش پاسخ هیدرولوژیکی	ضریب جبران تبخیر از خاک	۰/۰۳۷	۰/۲۱	۰/۱۸
v__SPCON.bsn	پارامتر خطی برای محاسبه حداکثر میزان رسوب	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱
v__SPEXP.bsn	پارامتر توان در برآورد بار رسوب آبراهه	۰/۹۳	۰/۵۶	۰/۵۶
v__CH_COV.rte	فاکتور پوشش آبراهه	۰/۰۶۱	۰/۰۴۵	۰/۷۸۵
v__CH_N2.rte	ضریب مانینگ کانال اصلی	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۰۹
v__GW_REVAP.gw	ضریب بالاآمدگی آب زیرزمینی	۰/۰۴۵	۰/۱۵	۰/۰۳۸
v__REVAPMN.gw	حد آستانه وقوع بالاآمدگی آب از آکیفر کم‌عمق (mm)	۱۲۰	۴۹۹	۳۸۱
v__GWQMN.gw	حد آستانه عمق آب در آکیفر کم‌عمق برای وقوع جریان برگشتی (mm)	۵۳۷	۴۱۱۰	۴۱۸۱
v__CH_EROD.rte	ضریب فرسایش‌پذیری کانال	۰/۰۸۱	۰/۲۱	۰/۵۳۲
v__SLSUBBSN. بخش پاسخ هیدرولوژیکی	میانگین طول شیب (m)	۴۸/۵	۱۴۵	۱۴۷/۳
v__USLE_P.mgt	فاکتور اقدامات حفاظتی	۰/۳۶	۰/۱۹۹	۰/۷۲۱
v__SMTMP.bsn	دمای پایه ذوب برف (°C)	۲/۵	۲/۷۵	۲/۷۵
v__SFTMP.bsn	دمای بارش برف (°C)	-۱/۲۹	-۰/۷۵	-۰/۷۵

جدول ۶. نتایج ارزیابی مدل در برآورد رواناب و رسوب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی

متغیر	معیار	ایستگاه گل‌گل		ایستگاه چاویز		ایستگاه اما	
		واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی
رواناب	R^2	۰/۷۵	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۶۴
	E_{NS}	۰/۵۹	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۴۳
رسوب	R^2	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۸۲	-	-
	E_{NS}	۰/۷۶	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۳۸	-	-

جدول ۷. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی پارامترهای کیفی

R^2	واسنجی/اعتبارسنجی	پارامتر کیفی	شماره رودخانه در مدل	ایستگاه اندازه‌گیری
۰/۷۹	واسنجی	نیتروژن	۵۰	گل‌گل
۰/۷۵	اعتبارسنجی			
۰/۷۸	واسنجی	فسفر		
۰/۶۳	اعتبارسنجی			
۰/۶۶	واسنجی	نیتروژن	۲۸	چاویز
۰/۵۷	اعتبارسنجی			
۰/۷۵	واسنجی	فسفر		
۰/۷۲	اعتبارسنجی			
۰/۶۵	واسنجی	نیتروژن	۴۸	اما
۰/۷۴	اعتبارسنجی			
۰/۶۸	واسنجی	فسفر		
۰/۵۹	اعتبارسنجی			

همان‌طور که نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد، نتایج قابل‌قبول می‌باشد. این مقادیر نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی پارامترهای نیتروژن و فسفر می‌باشد و نشان می‌دهد مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب، رسوب و مواد مغذی نیتروژن و فسفر مدل کارآمدی است. در زیرحوضه شماره ۵۰ که مربوط به ایستگاه گل‌گل می‌باشد، ضریب تبیین (R^2) به‌ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برای رواناب برابر ۰/۷۵ و ۰/۷۱، برای رسوب ۰/۶۸ و ۰/۶۶ و برای نیتروژن و فسفر به‌ترتیب برابر ۰/۷۹، ۰/۷۵، ۰/۷۸ و ۰/۶۳ می‌باشد که با مقایسه این مقادیر با ضرایب زیرحوضه‌های چاویز و اما (زیرحوضه‌های شماره ۲۸ و ۴۸)، می‌توان نتیجه گرفت که مدل در شبیه‌سازی پارامترهای مربوط به زیرحوضه گل‌گل بهتر عمل کرده است. دلیل این امر می‌تواند به‌دلیل اطلاعات کامل‌تری باشد که از این حوضه در دسترس بود؛ زیرا داده‌ها و اطلاعاتی نظیر هواشناسی و آب‌سنجی در ایستگاه گل‌گل کامل‌تر از ایستگاه‌های چاویز و اما بود. تنها ایستگاه بارشی که در حوضه آبریز سد ایلام واقع‌شده است، ایستگاه کلیماتولوژی میشخاص می‌باشد که بر روی رودخانه گل‌گل قرار دارد. این امر می‌تواند دلیلی باشد بر برتری نتایج حاصل از واسنجی و صحت سنجی ایستگاه گل‌گل نسبت به سایر ایستگاه‌ها که ایستگاه‌های کلیماتولوژی در فواصل دور از آن‌ها واقع‌شده است.

جدول ۸. میانگین بار سالانه خروجی هر یک از سه زیرحوضه گل‌گل، چاویز و اما

زیرحوضه	شماره زیرحوضه در مدل SWAT	نیتروژن (تن)	فسفر (تن)
گل‌گل	۵۰	۱۳۶/۲	۱۹/۸
چاویز	۲۸	۱۰۰/۴	۱۳/۲
اما	۴۸	۱۹/۶	۲

نتیجه‌گیری

نتایـج حاصل از این تحقیق نشـان می‌دهـد که مدل SWAT برای شبیه‌سـازی رواناب، رسـوب و مواد مغذی نیتروژن و فسـفر مدل کارآمدی است. مقادیر ضریب تبیین بـرای نیتروژن و فسـفر در مرحله واسـنجی به ترتیب برای زیرحوضه گل‌گل برابـر ۰/۷۹ و ۰/۷۸، چاویز ۰/۶۶ و ۰/۷۵ و اما ۰/۷۴ و ۰/۶۸ می‌باشد. متفاوت بودن پارامترهای مربوط به زیرحوضه‌هـای گل‌گل، چاویز و اما در مرحله واسـنجی برای شبیه‌سـازی رواناب، رسوب و پارامترهای کیفی نشان می‌دهـد که ویژگی‌هـای این حوضه‌ها بـا یکدیگر متفاوت اسـت و نمی‌تـوان از پارامترهای مربوط بـه یک زیرحوضه برای کالیبره نمودن کل حوضه استفاده کرد. مقایسه نتایج حاصل از واسـنجی و صحت سنجی نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی زیرحوضه گل‌گل بهتر عمل کرده است. دلیل این برتری می‌توانـد به‌دلیل اطلاعات کامل‌تر هیدرولوژیکی و هیدرومتری باشـد که از این زیرحوضه نسـبت به سـایر زیرحوضه‌ها در دسترس بود.

همچنیـن نتایج حاصـل از بـار آلودگی مـواد مغذی نشـان می‌دهد که بیشـترین میزان بار آلودگی مواد مغذی مربـوط به زیرحوضه گل‌گل می‌باشـد کـه از این زیرحوضه به‌طور سـالانه ۱۳۶/۲ تن نیتروژن و ۱۹/۸ تن فسـفر خارج می‌شود. همین‌طور از بین این سه زیرحوضه، چاویز در رتبه دوم قـرار دارد که مقدار نیتروژن و فسـفر خروجی از آن به ترتیب برابر ۱۰۰/۴ تن و ۱۳/۲ تن می‌باشـد. از زیرحوضه اما که کوچک‌ترین زیرحوضه سـد ایلام است ۱۹/۶ تن نیتروژن و ۲ تن فسـفر وارد سـد ایلام می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر، ۵۳ درصد نیتروژن ورودی به سـد ایلام از زیرحوضه گل‌گل، ۳۹ درصد از زیرحوضه چاویز و ۸ درصد نیز از زیرحوضه اما وارد سـد ایلام می‌گردد. همچنین سهم سه زیر حوضه گل‌گل، چاویز و اما در فسفر ورودی به سد ایلام به ترتیب برابر ۵۷، ۳۸ و ۵ درصد اسـت. تمامی موارد فـوق مؤید این مطلب است که سهم زیرحوضه گل‌گل در تولید مواد مغذی از بقیه زیرحوضه‌ها بیشتر اسـت. یکی از دلایل آن، وسعت بیشتر این زیرحوضه می‌باشـد که حدود ۶۳ درصد از مساحت کل حوضه را به‌خود اختصاص داده اسـت. هم‌چنین با توجه به این‌که میانگین شیب زیرحوضه گل‌گل حدود ۴۰ درصد ولی این میانگین شـیب در زیرحوضه‌های چاویز و اما حدود ۳۰ درصد اسـت نیز می‌توان دریافت که با توجه به بیشتر بودن شـیب در زیرحوضه گل‌گل، فرسـایش در آن بیشتر بوده و درنتیجه رسوب بیشتری به پایین‌دست حمل شده و به تبع میزان مواد مغذی نیز افزایش می‌یابد. همچنین بیشـترین سـهم را در بین منابع آلاینـده برای تولید نیتـروژن، کود حیوانی و برای تولید فسفر، کود شیمیایی دارا می‌باشد. لذا کنترل و مدیریت دام‌هایی که در سـطح حوضه در حال چرا می‌باشند و کودهایی که توسط کشاورزان مورد استفاده قرار می‌گیرند، نقش تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از مغذی شدن مخزن سد ایلام خواهند داشت.

منابع

- طاهریـون، م.، ۱۳۸۹. تدویـن الگـوی مدیریـت تغذیه‌گرایـی مخـزن سـد. پایان‌نامـه دکتری، دانشـکده محیط‌زیست دانشگاه تهران، ۲۵-۲۷.

- Abbaspour, K.C., 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, 413-430.

- Abbaspour, K.C., 2009. SWAT-CUP2; SWAT Calibration and Uncertainty Programs user manual. Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Swiss, 23-34.

- American Society of Agriculture Engineers(ASAE), 1998. Manure Production and Characteristic. In ASAE Standards, 45th edition, Section D384.1. ASAE, S. Joseph, 646-648.

- Arnold, J. G., Allen, P.M. and Bernhardt, G., 1993. A comprehensive surface groundwater flow model. Journal of Hydrology, 142, 1-4, 47-69.

- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R., 1998. Large area hydrologic modelling and assessment, Part I: Mod-

el development. Journal of the American Water Resources. Assoc، 34، l، 73-89.

- Chapra، S.، 1997. Surface Water Quality Modeling. Mc-Graw Hill Int، 40-43.

- Faramarzi، M.، Abbaspour، K.C.، Schulin، R. and Yang، H.، 2009. Modelling blue and green water resource availability in Iran. Hydrological processes، 23، 486-501.

- Karamouz، M.، Taheriyoun، M.، Emami، F. and Rouhanizadeh، B.، 2008. Assessment of Watershed Nutrient Load Input to Reservoir، A case study، World Environmental and Water Resources Congress، ASCE.

- Ouyang، W.، Hao، F.، Wang، X.، and Cheng، H.، 2009. Nonpoint source pollution responses simulation for conversion cropland to forest in mountains by SWAT in China. Environmental Management، 41، 79-89.

- Pohlert، T.، Huisman، J.A.، Breuer، L. and Frede، H.G.، 2005. Modelling of point and non-Point source pollution of nitrate with SWAT in the river Dill، Germany. Advances in Geosciences، 5، 7-12.

- Saleh، A. and Du، B.، 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS Program for the upper north bosque river watershed in central Texas. American Society of Agricultural Engineers، 47، 4، 1039-1049.

- Schul، J.، Abbaspour، K.C.، Yang، H. and Srinivasan، R.، 2008. Modeling blu and green water availability in Africa. Water Resources Research،. 44، W07406 d0i: 10.1029/2007WR006609،3-5.

- Shoemaker C.، 2007. Assessing phosphorus BMP effectiveness in the Cannonsville watershed using SWAT2000، World Environmental and Water Resources Congress، ASCE.

- Talebizadeh، M.، Morid، S.، Ayoubzadeh، S.A. and Gasemzadeh، M.، 2009. Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model. Water Resources Management.، DOI 10.10007/ s11269-009-9522-2.