

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

ابوالفضل بشیری<sup>(۱)</sup> و امین سارنگ<sup>(۲)</sup>

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 تخلیه‌شده از حوضه آبریز به مخزن یک سد 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 رضایت‌بخشی داشته است. مقایسه بار آلودگی سه زیر حوضه نشان می‌دهد که زیرحوضه گل‌گل بیشترین مقدار بار نیتروژن (۳۶/۲ تن در سال) و فسفر (۱۹/۸ تن در سال) 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

جمع‌آوری و تحلیل اطلاعات به همراه درک عمومی از نقش‌ها، اولویت‌ها و مسئولیت‌های همه ذی‌نفعان در یک حوضه آبریز می‌باشد. این رویکرد بر مبنای این مفهوم است که بهترین راه‌حل بسیاری از مشکلات کیفیت آب نظیر تجمع

رویکرد حوضه‌ای در مدیریت کیفی منابع آب یک فرآیند تصمیم‌گیری است که نشان‌دهنده استراتژی‌های کلی در

\* نویسنده مرتبط: ab\_bashiri@ut.ac.ir

(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 شبیه‌سازی شده 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 آبی 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. (Karamouz et al., 2008) 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 چپرا در مخزن شبیه‌سازی شده است؛ نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل تعریف‌شده حوضه و مخزن در تعیین سیاست‌های کنترلی بار آلودگی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. Saleh and

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 آبی 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 در نتیجه 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

به مدیران و مسئولین محیط‌زیست و متولیان آب منطقه در جهت تصمیم‌گیری و رسیدن به اهداف آب پاک راهگشا خواهد بود؛ چرا که حوضه مذکور به‌شدت از لحاظ تولید بار مواد مغذی مستعد بوده و دارای منابع متعددی از انواع مختلف آلاینده‌های مغذی است.

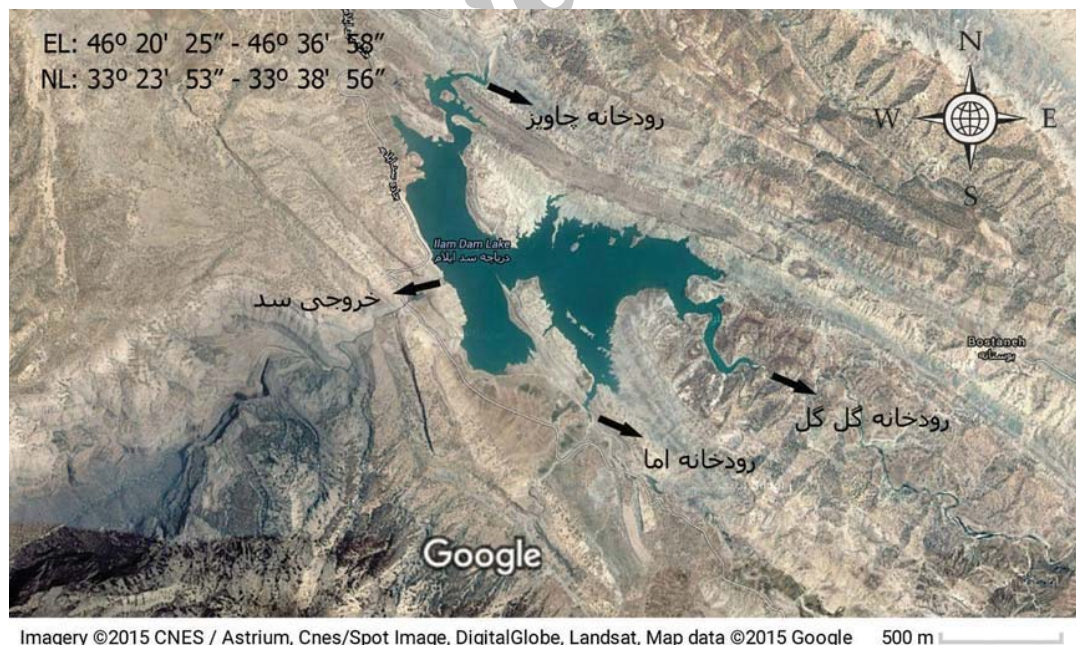
## مواد و روش‌ها

### محدوده مطالعاتی

حوضه آبریز سد ایلام در جنوب شرقی استان ایلام قرار دارد و از سه زیرحوضه گل‌گل، چاویز و اما تشکیل شده است. این حوضه دارای مختصات جغرافیایی  $25^{\circ} 20' 46''$  تا  $58^{\circ} 36' 46''$  طول شرقی و  $23^{\circ} 33' 33''$  تا  $56^{\circ} 38' 33''$  عرض شمالی می‌باشد. سد ایلام در ۲۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام و بر روی رودخانه کنجانچم (محل تلاقی سه رودخانه گل‌گل، اما و چاویز) قرار دارد. شکل ۱ تصویر ماهواره‌ای تهیه شده از سد ایلام و رودخانه‌های ورودی به آن را نشان می‌دهد. شکل ۲ نیز سه زیر حوضه اصلی سد ایلام را نشان می‌دهد.

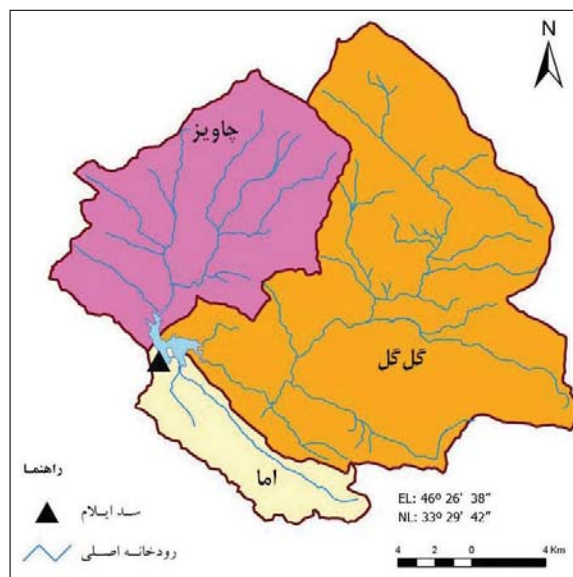
Du (2004) به‌منظور ارزیابی دو مدل با مقیاس حوضه‌ای SWAT و HSPF در نرم‌افزار BASINS 3.0، مطالعاتی را در حوضه رودخانه بوسک شمالی<sup>۱</sup> در مرکز نگزاس انجام دادند؛ جریان متوسط روزانه، رسوب و بار مواد مغذی در مدل SWAT در هر دو مورد واسنجی و صحت‌سنجی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که SWAT در هر دو مورد واسنجی و صحت‌سنجی مقادیر مواد مغذی را بهتر پیش‌بینی نمود.

از آنجاکه مخزن سد ایلام به دلیل ورود مداوم فاضلاب روستاهای بالادست، فضولات حیوانی، زهاب‌های کشاورزی و شیرابه زیاله، بهره‌برداری مخزن، فرسایش شدید در سطح حوضه و موارد متعدد دیگر در معرض خطرات زیست‌محیطی و بروز مشکلات کیفی آب قرار دارد، لذا در این تحقیق، شبیه‌سازی و تعیین بار آلودگی مواد مغذی در حوضه آبریز سد ایلام که یکی از حوضه‌های آبریز بسیار 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



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 این تحقیق با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> به بررسی ویژگی‌های حوضه پرداخته شده است. برای این منظور به کمک نرم افزار Arc GIS 9.3 خصوصیات فیزیوگرافی حوضه از قبیل مساحت، ارتفاع متوسط از سطح دریا و شیب متوسط هر زیرحوضه استخراج گردید که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیوگرافی حوضه سد ایلام

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

اطلاعات کیفی این تحقیق، از نتایج نمونه‌برداری‌ها و آزمایش‌های انجام شده روی رودخانه‌های بالادست سد ایلام توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس می‌باشد. جهت بررسی تغییرات کیفی رودخانه‌ها در بالادست مخزن سد ایلام تعداد ۱۹ نقطه نمونه‌برداری (۱۰ نقطه در زیرحوضه چاويز، ۶ نقطه در زیرحوضه گل گل و ۳ نقطه در زیرحوضه اما) جهت نمونه‌برداری تعیین گردید.

آمار و اطلاعات مورد استفاده شامل داده‌های بارندگی و دما در ایستگاه سینوپتیک ایلام، سایر ایستگاه‌های اقلیم‌شناسی ایلام، گلان، چنارباشی، ارکواز و داده‌های اندازه‌گیری شده رواناب روزانه در سه ایستگاه گل گل، چاويز و اما می‌باشد. این اطلاعات برای سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۰ جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفتند. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی به همراه طول دوره آماری اطلاعات مورد استفاده آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

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	چاوین	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
	چناریاشی	۱۰۳۰	۴۶ ۴۲	۳۳ ۲۸	۱۳۶۹-۱۳۸۳
	گلان	۵۴۵	۴۶ ۱۵	۳۳ ۲۵	۱۳۷۵-۱۳۸۴
	ارکواز	۱۳۰۰	۴۶ ۳۵	۳۳ ۲۳	۱۳۶۹-۱۳۸۳

Map Window مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از نسخه 2009 ARC SWAT استفاده شده است.

### روش مدل سازی 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<sup>۱</sup> 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 از لحاظ شیب، کاربری اراضی و خاک‌شناسی شباهت بالایی به هم دارند. هر چه وزن ذکر شده 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

### معرفی مدل SWAT

مدل SWAT مدلی جامع به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف درون حوضه می‌باشد و برای سازمان کشاورزی آمریکا توسعه داده شده 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 به صورت 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 آن که 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. در گذشته از نرم‌افزار Arc View بدین منظور استفاده می‌گردید اما در نسخه‌های جدیدتر SWAT، دو نرم‌افزار Arc GIS و



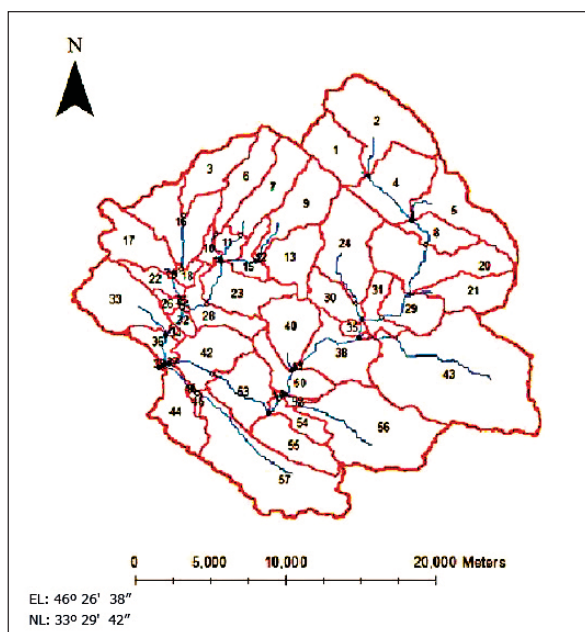
## اجرای مدل

به منظور 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 به خوبی 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 می‌گردد. براساس موقعیت ایستگاه‌های آب‌سنجی در نهایت 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 از جمله 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.

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

به منظور 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 درعین حال معنی‌دار باشند. سپس با در نظر گرفتن حدود اولیه عدم قطعیت پارامترها، نمونه‌برداری به روش لاتین هاپیرکیوب 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).



شکل ۳. زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های شبیه‌سازی شده در مدل SWAT

### منابع آلاینده واردشده به مدل

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، فسفات، 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 فسفات به مدل معرفی گردید. با توجه به مطالعات انجام‌شده فضولات گاوگوشتی، گاو شیری، گوسفند، مرغ تخم‌گذار و گوستی 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.

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

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 <sub>3</sub> -N/Min N
اوره	Urea	۰/۴۶	۰	۰	۰	۱
سوپر فسفات تربیل	۰۰-۴۵-۰۰	۰	۰/۲۴	۰	۰	۰
گاوگوشتی	DAIRY-FR	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۳۱	۰/۰۰۳	۰/۹۹
گاوشیری	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	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۹۹
مرغ گوشتی	BROIL-FR	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۹۹

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

(۲)

از حاصل ضرب این مقادیر در تعداد دام، وزن فضولات کلی به دست آمد. با توجه به این که اغلب دام‌های سنتی از مراتع حوضه تغذیه می‌کنند و با فرض آن که 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. به منظور وارد کردن 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.

به منظور شبیه‌سازی آلودگی ناشی از فعالیت‌های

دامداری سنتی در روستاهای موجود در منطقه با توجه به آمار موجود و همچنین نظرسنجی انجام شده، 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). در صورتی که وزن هر گاو ۶۴۰ کیلوگرم و وزن هر گوسفند ۲۷ کیلوگرم در نظر گرفته شود، میزان فضولاتی که هر دام به صورت روزانه تولید می‌کند از روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید.

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

(۱)

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

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

## نتایج و بحث

### واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

اعتبارسنجی مدل با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP و روش SUFI قابل انجام است (Abbaspour et al., 2007). پارامترهای نهایی انتخاب شده برای واسنجی ایستگاه‌ها در جدول ۵ قابل مشاهده می‌باشد. این مقادیر با توجه به نتایج پیشنهادی مدل SWAT-CUP و همچنین دامنه مجاز برای هر پارامتر تعیین شد. همچنین برای ارزیابی مناسب و خوب برازش نتایج مدل، ضریب تبیین<sup>۱</sup> و ضریب نش-ساتکلیف<sup>۲</sup> انتخاب شدند.

به منظور 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، به منظور شبیه‌سازی بار مواد مغذی، از داده‌های مربوط به نیمه دوم سال ۲۰۰۹ به منظور واسنجی و نیمه اول سال ۲۰۱۰ به منظور اعتبارسنجی استفاده شد. واسنجی و

1. R<sup>2</sup>

2. E<sub>NS</sub>



جدول ۵. نتایج واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل SWAT

مقدار نهایی پارامتر			توضیح	پارامتر و نحوه تغییر آن در واسنجی مدل
اما	چاویز	گل‌گل		
۶۸/۵	۶۸	۶۹	ضریب SCS (شماره منحنی رواناب)	v_CN2.mgt
۰/۱۸۸۰	۰/۱۸۹۸	۰/۱۸۵۶	ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (day/1)	v_ALPHA_BF.gw
۰/۰۵۵	۰/۳۸۰	۰/۰۷۷	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (m/m)	v_SOL_AWC().sol
۳۱۳	۳۹۷	۱۴۳/۹	زمان رسیدن آب از آخرین لایه خاک به سفره آب زیرزمینی (day)	v_GW_DELAY.gw
۷۵/۴	۵۰/۲	۴۸/۸۸	هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه‌های فرعی (mm/h)	v_CH_K1.sub
۴۰	۴۳	۹/۵۷	حداکثر ذخیره پوشش تاج گیاهی	v_CANMX بخش پاسخ هیدرولوژیکی
۰/۱۷۴	۰/۱۳	۰/۲۰	ضریب جریان پایه برای جریان‌های جانبی (day/1)	v_ALPHA_BNK.rte
۳۳/۲۹	۷۱/۹۵	۶۴/۸۳	هدایت هیدرولیکی مؤثر کانال در کانال اصلی (mm/h)	v_CH_K2.rte
۱۹۰۶	۱۳۴۵	۸۳۶	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (mm/h)	v_SOL_K.sol
۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۰۳۷	ضریب جبران تبخیر از خاک	v_ESCO بخش پاسخ هیدرولوژیکی
۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۲۳	پارامتر خطی برای محاسبه حداکثر میزان رسوب	v_SPCON.bsn
۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۹۳	پارامتر توان در برآورد بار رسوب آبراهه	v_SPEXP.bsn
۰/۷۸۵	۰/۰۴۵	۰/۰۶۱	فاکتور پوشش آبراهه	v_CH_COV.rte
۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۲	ضریب مانینگ کانال اصلی	v_CH_N2.rte
۰/۰۳۸	۰/۱۵	۰/۰۴۵	ضریب بالآمدگی آب زیرزمینی	v_GW_REVAP.gw
۳۸۱	۴۹۹	۱۲۰	حد آستانه وقوع بالآمدگی آب از آکیفر کم عمق (mm)	v_REVAPMN.gw
۴۱۸۱	۴۱۰	۵۳۷	حد آستانه عمق آب در آکیفر کم عمق برای وقوع جریان برگشتی (mm)	v_GWQMN.gw
۰/۵۳۲	۰/۲۱	۰/۰۸۱	ضریب فرسایش پذیری کانال	v_CH_EROD.rte
۱۴۷/۳	۱۴۵	۴۸/۵	میانگین طول شیب (m)	v_SLSUBBSN بخش پاسخ هیدرولوژیکی
۰/۷۲۱	۰/۱۹۹	۰/۳۶	فاکتور اقدامات حفاظتی	v_USLE_P.mgt
۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۵	دمای پایه ذوب برف (°C)	v_SMTMP.bsn
-۰/۷۵	-۰/۷۵	-۱/۲۹	دمای بارش برف (°C)	v_SFTMP.bsn

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 <sup>2</sup>	۰/۷۵	۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۱	۰/۶۴
	E <sub>NS</sub>	۰/۵۹	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۵۵	۰/۴۳
رسوب	R <sup>2</sup>	۰/۷۸	۰/۷۳	۰/۹۱	۰/۸۲	-	-
	E <sub>NS</sub>	۰/۷۶	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۳۸	-	-

جدول ۷. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی پارامترهای کیفی

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

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 واقع شده 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 واقع شده 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

همان‌طور که نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد، نتایج قابل قبول 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<sup>2</sup>) به ترتیب 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 به ترتیب 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 به دلیل اطلاعات کامل‌تری باشد که از این حوضه در دسترس بود؛

## نتیجه‌گیری

این‌که میانگین شیب زیرحوضه گل‌گل حدود ۴۰ درصد ولی این میانگین شیب در زیرحوضه‌های چاویز و اما حدود ۳۰ درصد است نیز می‌توان دریافت که با توجه به بیشتر بودن شیب در زیرحوضه گل‌گل، فرسایش در آن بیشتر بوده و در نتیجه رسوب بیشتری به پایین دست حمل شده و به تبع میزان مواد مغذی نیز افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین سهم را در بین منابع آلاینده برای تولید نیتروژن، کود حیوانی و برای تولید فسفر، کود شیمیایی دارا می‌باشد. لذا کنترل و مدیریت دام‌هایی که در سطح 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

- طاهریون، م.، ۱۳۸۹. تدوین الگوی مدیریت تغذیه‌گرایی مخزن سد. پایان‌نامه دکتری، دانشکده 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-

نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب، رسوب و مواد مغذی نیتروژن و فسفر مدل کارآمدی است. مقادیر ضریب تبیین برای نیتروژن و فسفر در مرحله واسنجی به ترتیب برای زیرحوضه گل‌گل برابر ۰/۷۹ و ۰/۷۸، چاویز ۰/۶۶ و ۰/۷۵ و اما ۰/۷۴ و ۰/۶۸ می‌باشد. متفاوت بودن پارامترهای مربوط به زیرحوضه‌های گل‌گل، چاویز و اما در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی رواناب، رسوب و پارامترهای کیفی نشان می‌دهد که ویژگی‌های این حوضه‌ها با یکدیگر متفاوت است و نمی‌توان از پارامترهای مربوط به یک زیرحوضه برای کالیبره نمودن کل حوضه استفاده کرد. مقایسه نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی زیرحوضه گل‌گل بهتر عمل کرده است. دلیل این برتری می‌تواند به دلیل اطلاعات کامل‌تر هیدرولوژیکی و هیدرومتری باشد که از این زیرحوضه نسبت به سایر زیرحوضه‌ها در دسترس بود.

همچنین نتایج حاصل از بار آلودگی مواد مغذی نشان می‌دهد که بیشترین میزان بار آلودگی مواد مغذی مربوط به زیرحوضه گل‌گل می‌باشد که از این زیرحوضه به‌طور سالانه ۱۳۶/۲ تن نیتروژن و ۱۹/۸ تن فسفر خارج می‌شود. همین‌طور از بین این سه زیرحوضه، چاویز در رتبه دوم قرار دارد که مقدار نیتروژن و فسفر خروجی از آن به ترتیب برابر ۱۰۰/۴ تن و ۱۳/۲ تن می‌باشد. از زیرحوضه اما که کوچک‌ترین زیرحوضه سد ایلام است ۱۹/۶ تن نیتروژن و ۲ تن فسفر وارد سد ایلام می‌گردد. به عبارت دیگر، ۵۳ درصد نیتروژن ورودی به سد ایلام از زیرحوضه گل‌گل، ۳۹ درصد از زیرحوضه چاویز و ۸ درصد نیز از زیرحوضه اما وارد سد 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 است. تمامی موارد فوق مؤید این مطلب است که سهم زیرحوضه گل‌گل در تولید مواد مغذی از بقیه زیرحوضه‌ها بیشتر است. یکی از دلایل آن، وسعت بیشتر این زیرحوضه می‌باشد که حدود ۶۳ درصد از مساحت کل حوضه را به‌خود اختصاص داده است. همچنین با توجه به

- el development. *Journal of the American Water Resources Assoc*, 34, 1, 73-89.
- Chapra, S., 1997. *Surface Water Quality Modeling*. Mc-Graw Hill Int, 40-43.
  - Faramarzi, M., Abbaspour, K.C., Schul, 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 blue and green water availability in Africa. *Water Resources Research*, 44, W07406 doi: 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 10.1007/ s11269-009-9522-2.