

## شبیه‌سازی جریان ورودی به دریاچه ارومیه با استفاده از مدل SWAT

سمیرا اخوان\* و آیدین جودی حمزه‌آباد<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۶)

### چکیده

دریاچه ارومیه واقع شده در شمال غربی ایران، در معرض انواع تهدیدات مانند خشکسالی، احداث سدهای متعدد، تغییر کاربری اراضی و افزایش دما روبرو است. با توجه به اهمیت دریاچه هرگونه مطالعه که به شناسایی مشکلات در این حوضه بیانجامد دارای توجیه می‌باشد. در مطالعه حاضر، توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی جریان حوضه آبریز ارومیه با مساحت ۵۲۰۰۰ کیلومترمربع مورد بررسی قرار گرفت. مدل برای دوره زمانی ۱۹۹۷-۱۹۸۰ اجرا شد که بازه زمانی ۱۹۹۱-۱۹۸۰ برای دوره واسنجی و دوره ۱۹۹۸-۱۹۹۲ به‌عنوان اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. نتایج واسنجی در ۱۰ درصد ایستگاه‌های هیدرومتری در حد خیلی خوب و ۸۵ درصد از ایستگاه‌ها مناسب ارزیابی شدند. همچنین نتایج اعتبارسنجی نشان داد که به ترتیب در ۲۵ و ۴۵ درصد ایستگاه‌های نتایج در حد خیلی خوب و مناسب بوده است. این شرایط نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی جریان در این حوضه می‌باشد. همچنین برخی عوامل تأثیرگذار بر رواناب ورودی به دریاچه در سال‌های اخیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که تغییرات اخیر (احداث سدهای متعدد، تغییر اقلیم و کاربری اراضی) در حوضه سبب کاهش حجم رواناب ورودی به دریاچه در حدود ۸۰ درصد گردیده است. بنابراین، اگر شرایط مدیریتی طبیعی در حوضه آبریز برقرار بود وضعیت دریاچه می‌توانست بهتر از وضعیت کنونی باشد.

واژه‌های کلیدی: دریاچه ارومیه، جریان طبیعی، SWAT، عدم قطعیت

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

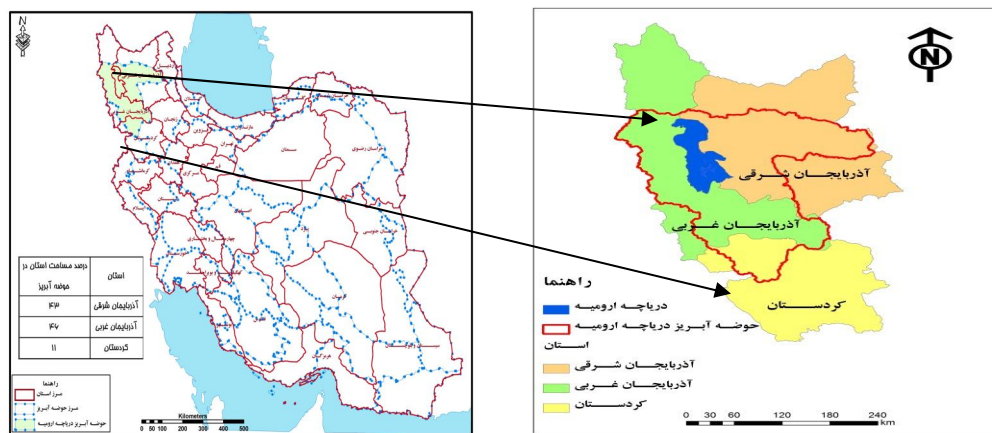
\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.akhavan@basu.ac.ir

## مقدمه

دریاچه ارومیه امروزه در معرض انواع تهدیدات و تغییرات هیدرولوژیکی قرار دارد. تهدیداتی از قبیل خشکسالی‌های پی‌درپی، احداث سدهای متعدد، تغییرات گسترده در کاربری اراضی مناطق مختلف کشاورزی و شهری، افزایش سطح زیرکشت، افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی و افزایش دمای جهانی که باعث افزایش تبخیر و تعرق می‌شود، روبرو است. با در نظر گرفتن این تغییرات و تهدیدات و با علم به این که وجود این دریاچه زیبا عامل تداوم حیات در شمال غرب کشور است، بنابراین حفظ کیفیت و کمیت منابع آبی این حوضه تأثیر به‌سزایی در رشد و توسعه کشاورزی و اقتصادی منطقه خواهد داشت. اولین مسئله‌ای که در ارتباط با این حوضه مطرح می‌شود میزان دبی ورودی به دریاچه می‌باشد که با توجه به جمعیت زیاد و رونق کشاورزی و صنعتی منطقه در فصل کشت دبی چندانی از طریق رودخانه‌ها وارد دریاچه نمی‌شود. بنابراین اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تمام رواناب‌هایی که وارد دریاچه می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا استفاده از مدل‌هایی که توانایی شبیه‌سازی رواناب را داشته باشند در حوضه‌های آبریز از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. یکی از مدل‌هایی که به این منظور در سطح جهانی مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرد مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tools) می‌باشد. مدل SWAT به‌عنوان مدلی که توانایی بسیار خوبی در ارزیابی و تجزیه و تحلیل تأثیر شیوه‌های مدیریت آب در زمین، رسوب و عملکرد شیمیایی آلاینده‌های کشاورزی در حوضه‌های بزرگ و پیچیده دارد شناخته شده است (۵). همچنین این مدل برای آنالیزهای طولانی‌مدت طراحی شده است و به‌طور گسترده در ایالات متحده آمریکا و بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران به‌کار برده می‌شود. به‌طور مثال، گودرزی و همکاران (۷) به مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو پرداختند. نتایج نشان داد که مدل SWAT با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۸ و معیار خطای ۱/۲ و

مدل SIMHYD با ضریب نش-ساتکلیف ۰/۶۸ و معیار خطای ۱/۵ بیشترین و کمترین کارایی را دوره واسنجی دارند. همچنین مقدار ضریب نش-ساتکلیف و معیار خطا در دوره ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰ میلادی برای مدل SWAT به ترتیب ۰/۷۳ و ۱/۱ و برای مدل SIMHYD به ترتیب ۰/۴ و ۲ به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر و کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب این حوضه آبریز است. رضایی‌زمان و همکاران (۴) از مدل SWAT برای بررسی اثر تغییر اقلیم در حوضه سمینه‌رود استفاده نمودند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که شبیه‌سازی رواناب توسط مدل در حد قابل قبول بوده است، همچنین اثر تغییر اقلیم تبعات منفی بر اقلیم حوضه دارد که باعث کاهش ۲۵ درصد منابع آبی حوضه می‌گردد. اخوان و همکاران (۲) با استفاده از مدل SWAT میزان آب آبی (مجموع رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی عمیق) و آب سبز (تبخیر و تعرق واقعی و رطوبت خاک) را در حوضه آبریز همدان-بهار تخمین زدند. نتیجه شبیه‌سازی در بیشتر ایستگاه‌ها به‌ویژه خروجی حوضه رضایت‌بخش بود. سنگن (۱۷) اقدام به شبیه‌سازی حوضه آبریز دریاچه تانا در کشور اتیوپی با مدل SWAT 2005 نمود. نتایج مطالعه آنها نشان‌دهنده توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی دریاچه تانا می‌باشد. مورتی و همکاران (۱۴) از مدل SWAT به منظور بررسی بیلان آب حوضه کن هند مرکزی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل قادر به ارزیابی قابل قبول هیدرولوژی این حوضه است.

بنابراین با توجه به مطالعات پیشین در مورد توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و نیز اهمیت شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز ارومیه، هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی این حوضه آبریز با استفاده از مدل ArcSWAT، واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از نرم‌افزار SWATCUP (Swat Calibration and uncertainty Program) و روش Sufi-2 (Sequential Uncertainty Fitting version 2) می‌باشد. از اهداف مهم دیگر این تحقیق، شبیه‌سازی جریان ورودی به دریاچه در حالت جریان طبیعی و مقایسه آن با شرایط حاکم بر



شکل ۱. محل قرارگیری حوزه آبریز دریاچه ارومیه در کشور ایران

دریاچه می‌باشد. مدیترانه‌ای با بارش اندک تابستانه می‌باشد. میانگین دمای سالیانه در حوزه آبریز دریاچه ارومیه از حدود ۱۱ درجه در اطراف دریاچه تا حدود ۲/۵ درجه در ارتفاعات سهند و سبلان متغیر است (۳).

دریاچه می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه در یک فرورفتگی طبیعی، تقریباً در مرکز حوزه آبریز در مرز میان استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی در گوشه شمال غربی ایران واقع شده است. این حوزه بین مختصات جغرافیایی  $44^{\circ}07'$  تا  $47^{\circ}53'$  طول شرقی و  $35^{\circ}40'$  تا  $38^{\circ}30'$  عرض شمالی واقع شده است. این حوزه در سطحی معادل  $51876$  کیلومتر مربع، حدود نیمی از استان آذربایجان غربی، بخش وسیعی از استان آذربایجان شرقی و قسمتی از استان کردستان را شامل می‌شود. حدود  $33469$  کیلومتر مربع از سطح حوزه دریاچه ارومیه را مناطق کوهستانی و  $12564$  کیلومتر مربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل داده و  $5320$  کیلومتر مربع آن را نیز دریاچه ارومیه در بر گرفته است. دریاچه ارومیه با حجمی معادل بین  $16$  تا  $32$  میلیارد مترمکعب بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران به شمار می‌رود (شکل ۱). براساس تقسیم‌بندی حوزه‌های آبریز کشور، حوزه دریاچه ارومیه یکی از شش حوزه اصلی ایران است (۳).

میانگین سالانه بارندگی در حوزه مطالعاتی دریاچه ارومیه بین  $300$  تا  $700$  میلی‌متر متغیر است و رژیم غالب آن

### مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل فیزیکی و مفهومی با بازده محاسباتی بالا می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طرح‌ریزی شده است. این مدل برای گام‌های زمانی روزانه در مقیاس حوزه‌ای طراحی و ارائه شده است (۱۵). مدل SWAT برای پیش‌بینی تأثیر شیوه‌های مدیریت اراضی بر کیفیت شیمیایی آب، رسوب و عملیات کشاورزی در حوزه‌های بزرگ و پیچیده با خاک‌های مختلف، کاربری اراضی متفاوت و متغیر در بازه زمانی طولانی مدت طراحی شده است (۱۱ و ۱۵). SWAT از دو سطح تفکیک مکانی حوزه آبریز استفاده می‌کند، جداسازی اولیه که براساس شاخص توپوگرافی انجام می‌شود و سپس برای تفکیک بیشتر از ملاحظات کاربری اراضی و نوع خاک استفاده می‌کند. مناطق مورد مطالعه در این قسمت از مدل به واحدهای واکنش هیدرولوژیک (Hydrologic Response Units, HRU) تقسیم‌بندی می‌شوند.

در مطالعه حاضر برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، از روش هارگریوز با توجه به داده‌های هواشناسی موجود، استفاده

سینوپتیک موجود در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد، از دیگر داده‌های هواشناسی مورد نیاز این مدل حداکثر و حداقل دمای روزانه و نیز تابش خورشیدی است. به این منظور از اطلاعات ثبت شده توسط ۱۵ ایستگاه سینوپتیک موجود استفاده شد که این اطلاعات از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. علاوه بر این، با توجه به این که اکثر سدهای موجود در حوضه آبریز دریاچه ارومیه اخیراً مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند لذا تلاش شد تأثیر سدهای قدیمی و با حجم مخزن بالا در نظر گرفته شود.

پس از جمع‌آوری اطلاعات و مشخصات حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تهیه فایل‌های ورودی، کار اولیه برای اجرای مدل شروع شد. گام اول تقسیم‌بندی حوضه براساس نقشه DEM و شبکه جریان می‌باشد که حوضه آبخیز به زیرحوضه‌های مختلف تقسیم می‌شود. حوضه آبریز دریاچه ارومیه با حداقل منطقه زهکشی ۱۰۰ هکتار و حذف تعدادی از خروجی‌های غیرضروری و اضافه کردن تعدادی خروجی در موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری، به ۶۴۵ زیرحوضه تقسیم شد که این زیرحوضه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است. تعداد HRUها نیز برابر تعداد زیرحوضه‌ها در نظر گرفته شد.

### واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT

به منظور واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت از الگوریتم SUFI-2 موجود در نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شد. در الگوریتم SUFI-2، عدم قطعیت برای تمام منابع مؤثر همچون بارش باران، مدل مفهومی، پارامترهای اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. در این برنامه از عامل P-factor برای بیان میزان تأثیر تمام پارامترهایی که باعث به وجود آمدن عدم قطعیت شده‌اند استفاده می‌گردد، که بیان‌گر درصد داده‌هایی است که باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در سطح اطمینان ۹۵ درصد است. R-factor از دیگر پارامترهای مشخص کننده تحلیل عدم قطعیت در برنامه SUFI-2 می‌باشد که عبارت از متوسط پهنای باند اطمینان ۹۵ درصد است که از تقسیم انحراف استاندارد

شده است. رواناب سطحی، از مقادیر بارندگی روزانه و به روش SCS به دست می‌آید. همچنین مدل SWAT از دو فاز زمین و روندیابی برای شبیه‌سازی هیدرولوژی بهره می‌برد، که در فاز زمین مقادیر رسوب، آفت‌کش‌ها، و مواد مغذی وارد شده به آبراهه اصلی در هر زیرحوضه شبیه‌سازی می‌گردد، و در مرحله روندیابی، جریان آب را به خروجی حوضه از طریق شبکه کانال اصلی برآورد می‌نماید. در این مطالعه رواناب محاسبه شده از هر زیرحوضه از طریق شبکه جریان، به روش ذخیره متغیر، به سمت خروجی اصلی حوضه روندیابی می‌گردد (۱۵). چرخه هیدرولوژی توسط SWAT بر مبنای معادله بیلان آبی تعریف شده است که با رابطه زیر بیان می‌شود:

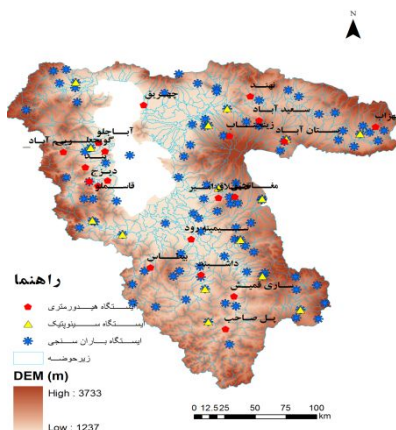
$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad [1]$$

که در این رابطه:  $SW_t$ : مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)،  $SW_0$ : مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)،  $t$ : زمان (روز)  $R_{day}$ : مقدار بارش در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $Q_{surf}$ : مقدار رواناب در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $E_a$ : مقدار تبخیر و تعرق در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر)،  $W_{seep}$ : مقدار آبی که از پروفیل خاک وارد منطقه غیر اشباع می‌شود (میلی‌متر)،  $Q_{gw}$ : مقدار جریان برگشتی در روز  $\Delta t$  (میلی‌متر) (۱۵).

مدل به وسیله واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU) می‌تواند تفاوت تبخیر و تعرق انواع گیاهان در خاک‌های متفاوت را در نظر بگیرد. مدل به طور جداگانه برای هر واحد (HRU) رواناب را تخمین می‌زند و سپس کل رواناب حوضه از جمع تمام واحدها به دست می‌آید. این کار باعث افزایش دقت مدل می‌شود (۱۵).

### اطلاعات مورد استفاده و تنظیم مدل SWAT حوضه آبریز ارومیه

به منظور تنظیم و ساختن مدل SWAT در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از نقشه‌های ارتفاعی (DEM) ۹۰ متری، نقشه شبکه جریان، نقشه کاربری اراضی و خاک استفاده گردید. همچنین از داده‌های بارش روزانه ۸۳ ایستگاه باران‌سنجی و ۱۵ ایستگاه



شکل ۲. نقشه زیرحوضه‌های ایجاد شده توسط مدل SWAT، مدل ارتفاعی دیجیتال (DEM).

شبکه جریان و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مربوطه در جدول ۱ بیان شده است. بعد از انتخاب پارامترها، آنالیز حساسیت انجام گردید. مشخص شد که اکثر پارامترهای انتخاب شده از لحاظ تحلیل حساسیت پارامترهای اثرگذاری بر رواناب بودند و به ترتیب پارامترهای SUB\_SFTMP، CN2، SUB\_SMTMP، SUB\_SMFMX، SUB\_SMFM و SUB\_TIMP دارای بیشترین تأثیر بر شبیه‌سازی رواناب بودند. البته با توجه به کوهستانی بودن حوضه آبریز و سهم بیش از ۳۵ درصدی بارش برف در این حوضه آبریز (۳) این نتایج با واقعیت‌های این حوضه آبریز تطابق کامل دارد، همچنین فرامرزی و همکاران (۱۲) و اخوان و همکاران (۱۰) که در حوضه‌های کوهستانی برف‌گیر اقدام به شبیه‌سازی کردند به نتایج مشابهی از آنالیز حساسیت در این گونه مناطق دست یافتند.

به منظور واسنجی دقیق حوضه تعداد ۳۲۹ پارامتر تعریف شد که ساخته شده از ۲۴ پارامتر جدول ۱ می‌باشد. شول و همکاران (۱۴) از همین روند برای تعریف پارامترها در هر یک زیرحوضه‌ها آفریقا استفاده کردند و به نتایج رضایت‌بخشی دست یافتند. پس از ۳۰۰۰ مرحله شبیه‌سازی و تصحیح پارامترها و پس از این که دامنه پارامترها بعد از اصلاح در هر مرحله کاهش یافت و باند عدم قطعیت شبیه‌سازی به میزان قابل قبولی رسید، نتایج حاصل شده به‌عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد که در جدول ۲ بیان شده است. براساس نتایج

داده‌های شبیه‌سازی بر داده‌های واقعی به دست می‌آید. از لحاظ تئوری مقادیر عددی R-factor و P-factor به ترتیب در محدوده صفر تا ۱۰۰ درصد و صفر تا بی‌نهایت قرار می‌گیرند. اما در عمل، امکان رسیدن به چنین ارقامی وجود ندارد (۹).

به منظور واسنجی (۱۹۹۱-۱۹۸۰) و اعتبارسنجی (۱۹۹۸-۱۹۹۲) مدل از رواناب اندازه‌گیری شده ماهانه در ۲۰ ایستگاه هیدرومتری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد (شکل ۲). به منظور مقایسه دبی ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای از تابع هدف زیر استفاده شده است:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})_i^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad [2]$$

که در NS ضریب نش-ساتکلیف،  $Q_{obs}$  مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب،  $\overline{Q_{obs}}$  متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب،  $Q_{sim}$  مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب،  $\overline{Q_{sim}}$  متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

## نتایج و بحث

آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت به منظور واسنجی مدل، در این مطالعه از ۲۴ پارامتر اصلی مؤثر بر رواناب استفاده شد که لیست این پارامترها و توضیحات

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در واسنجی مدل حوضه آبریز دریاچه ارومیه

ردیف	پارامتر	توضیحات	ردیف	پارامتر	توضیحات
۱	CN <sub>2</sub> .mgt	شماره منحنی برای شرایط رطوبتی	۱۳	ESCO.hru	فاکتور جبران تبخیر از خاک
۲	GW_DELAY.gw	زمان تأخیر برای تغذیه آبخوان	۱۴	SLSUBBSN.hru	متوسط طول (شیب)
۳	GW_REVAP.gw	ضریب آبی که از سفره‌های کم عمق به پروفیل خاک برمی‌گردد	۱۵	OV_N.hru	ضریب مانینگ برای جریان سطحی روی زمین
۴	ALPHA_BF.gw	ثابت کاهش جریان پایه	۱۶	ALPHA_BNK.rte	فاکتور نگهداشت رطوبتی
۵	REWAPMN.gw	عمق آستانه آب در آبخوان کم عمق برای نفوذ به آبخوان عمیق	۱۷	CH_K2.rte	هدایت هیدرولیکی مؤثر در آبراهه اصلی
۶	GWQMN.gw	عمق آستانه آب در آبخوان کم عمق برای برگشت جریان (متر)	۱۸	CH_N2.rte	ضریب مانینگ برای جریان در آبراهه اصلی
۷	RCHRG_DP.gw	ضریب نفوذ آبخوان	۱۹	SUB_SFTMP.sno	دمای بارش برف
۸	SOL_AWC.sol	متوسط آب قابل استفاده (میلی‌متر بر میلی‌متر)	۲۰	SUB_SMTMP.sno	دمای پایه ذوب برف
۹	SOL_K.sol	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	۲۱	SUB_SMFMX.sno	فاکتور ذوب برف در ۲۱ ژوئن
۱۰	SOL_BD.sol	جرم مخصوص ظاهری خاک	۲۲	SUB_SMFMN.sno	فاکتور ذوب برف در ۲۱ دسامبر
۱۱	SOL_ALB.sol	آلبدوی خاک مرطوب	۲۳	SUB_TIMP.sno	فاکتور تأخیر در ذوب برف
۱۲	EPCO.hru	فاکتور جبران جذب گیاهی	۲۴	SURLAG.bsn	ضریب تأخیر رواناب سطحی

جدول ۲ ضریب تبیین ( $R^2$ ) در حالت واسنجی در محدوده ۳۰ تا ۸۱ درصد می‌باشد که به ترتیب برای ایستگاه‌های نهند و قاسم‌لو به دست آمده است و از لحاظ این آماره شبیه‌سازی تنها در ایستگاه‌های نهند و آباجلو مورد تأیید نمی‌باشد. کمترین مقدار ناش-ساتکلیف (NS) در ایستگاه آباجلو (۰/۱۶) و بیشترین مقدار آن در ایستگاه گویجعلی (۰/۶۷) گزارش شده است. بهترین نتایج در مرحله واسنجی برای شاخص‌های ناش-ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) به ترتیب برای ایستگاه گویجعلی ۰/۶۷ و ۰/۷۷ برای ایستگاه دیزج ۰/۶۶ و ۰/۶۶ برای ایستگاه قاسم‌لو ۰/۵۶ و ۰/۸۱ به دست آمد. طبق گزارش موربانی (۱۳) اگر ضریب ناش-ساتکلیف

(NS) بیشتر از ۰/۶۵ باشد نتایج واسنجی و اعتبارسنجی خیلی خوب، اگر بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ نتایج مناسب و اگر کمتر از ۰/۵ باشد نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رضایت‌بخش است (۱۳). مطابق با این گزارش و جدول ۲، نتایج واسنجی در ۱۰ درصد ایستگاه‌های در حد خیلی خوب و در ۸۵ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی مناسب بوده است. این شرایط نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. توانایی مدل در شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های با ابعاد مختلف در مطالعات اخوان و همکاران (۱۰)، عباسپور و همکاران (۸)، شول و همکاران (۱۶) نیز اثبات گردیده است. همچنین قدسی و همکاران (۶)

جدول ۲ ضریب تبیین ( $R^2$ ) در حالت واسنجی در محدوده ۳۰ تا ۸۱ درصد می‌باشد که به ترتیب برای ایستگاه‌های نهند و قاسم‌لو به دست آمده است و از لحاظ این آماره شبیه‌سازی تنها در ایستگاه‌های نهند و آباجلو مورد تأیید نمی‌باشد. کمترین مقدار ناش-ساتکلیف (NS) در ایستگاه آباجلو (۰/۱۶) و بیشترین مقدار آن در ایستگاه گویجعلی (۰/۶۷) گزارش شده است. بهترین نتایج در مرحله واسنجی برای شاخص‌های ناش-ساتکلیف (NS) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) به ترتیب برای ایستگاه گویجعلی ۰/۶۷ و ۰/۷۷ برای ایستگاه دیزج ۰/۶۶ و ۰/۶۶ برای ایستگاه قاسم‌لو ۰/۵۶ و ۰/۸۱ به دست آمد. طبق گزارش موربانی (۱۳) اگر ضریب ناش-ساتکلیف

جدول ۲. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

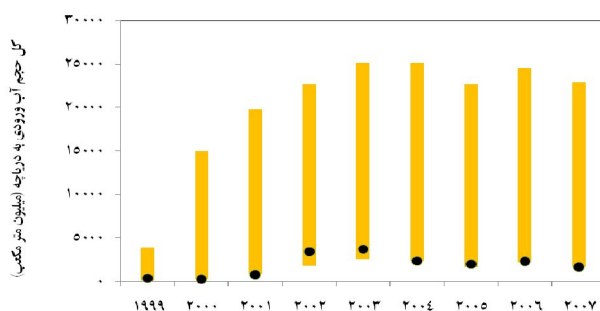
ردیف	ایستگاه	واسنجی (۱۹۹۱-۱۹۸۰)				اعتبارسنجی (۱۹۹۸-۱۹۹۲)			
		NS	R	R-factor	p-factor	NS	R	R-factor	p-factor
۱	نهند	۰/۵۶	۰/۳۰	۱/۰۳	۰/۸۹	۰/۷۵	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۶۵
۲	سعیدآباد	۰/۳۱	۰/۵۲	۰/۹۶	۰/۸۴	۰/۶۲	۰/۷۶	۳/۴۶	۰/۸۷
۳	چهریق	۰/۵۱	۰/۶۸	۱/۷۱	۰/۸۸	۰/۵۱	۰/۶۱	۰/۷۲	۰/۸۵
۴	بستان‌آباد	۰/۵۱	۰/۵۸	۰/۲۲	۰/۲۱	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۲۱	۰/۲۹
۵	زینجناب	۰/۳۵	۰/۶۰	۳/۴۵	۰/۸۶	۰/۶۳	۰/۷۲	۲/۹۹	۰/۹۷
۶	آباجلو	۰/۱۶	۰/۴۱	۲/۷۲	۰/۷۹	۰/۵۷	۰/۵۸	۳/۶۷	۰/۸۲
۷	سهزاب	۰/۶۳	۰/۷۳	۱/۱۵	۰/۷۴	۰/۴۵	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۵۴
۸	کریم‌آباد	۰/۵۴	۰/۶۳	۱/۳۴	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۶۷
۹	گویجعلی	۰/۶۷	۰/۷۷	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۷۱	۰/۴۷	۰/۶۷
۱۰	بند	۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۷۸	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۶۷	۰/۶۳
۱۱	دیزج	۰/۶۶	۰/۶۶	۰/۹۱	۰/۶۷	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۹	۰/۶۸
۱۲	بابارود	۰/۶۳	۰/۶۶	۱/۳۴	۰/۸۲	۰/۴۵	۰/۴۷	۱/۳۵	۰/۷۷
۱۳	قاسم‌لو	۰/۵۶	۰/۸۱	۰/۶۹	۰/۵۱	۰/۸۳	۰/۸۴	۱/۱۸	۰/۵۴
۱۴	مغانجیق	۰/۵۲	۰/۶۵	۰/۸۷	۰/۵۸	۰/۶۲	۰/۶۷	۰/۸۳	۰/۴۶
۱۵	قشلاق‌امیر	۰/۶۲	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۵۴	۰/۴۴	۰/۴۶	۰/۵۹	۰/۴۳
۱۶	سیمینه‌رود	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۱۹	۰/۶۳	۰/۵۷	۰/۶۶	۰/۲	۰/۴۸
۱۷	داشبند	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۱۹	۰/۶۳	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۲۲	۰/۳۵
۱۸	بیطاس	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۵۹	۰/۵۰	۱/۰۵	۰/۷۰
۱۹	ساری‌قمیش	۰/۵	۰/۵۵	۰/۷۹	۰/۶۶	۰/۴۹	۰/۴۶	۰/۷	۰/۸۲
۲۰	پل‌صاحب	۰/۵۲	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۶۸	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۶۳	۰/۷۱

که نشان‌دهنده کمبود اطلاعات هواشناسی دقیق و اطلاعات برداشت‌های ثبت نشده از منابع آب می‌باشد.

ضریب تبیین در مورد قسمت اعتبارسنجی با توجه به جدول ۲ در محدوده ۴۵ تا ۸۴ درصد می‌باشد که به ترتیب برای ایستگاه‌های دیزج و قاسم‌لو و بستان‌آباد به دست آمده است و از لحاظ این آماره شبیه‌سازی تمامی ایستگاه‌ها مورد تأیید می‌باشد. محدوده تغییرات آماره NS دوره اعتبارسنجی با توجه به جدول ۲ در محدوده ۴۴ تا ۸۴ قرار گرفته است که به ترتیب برای ایستگاه‌های دیزج و بستان‌آباد می‌باشد که این نتایج برای تمام ایستگاه‌ها نیز مورد تأیید است. بهترین نتایج در مرحله

در مطالعه‌ای از مدل SWAT به منظور بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه آبریز آجی‌چای و ورودی آن به دریاچه ارومیه استفاده کردند نتایج آنها نشان داد که مدل SWAT توانایی خوبی را در شبیه‌سازی رواناب در این حوضه دارد، که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد.

مقدار P-factor بین ۰/۲۱ تا ۰/۸۹ و مقدار R-factor بین ۰/۲۲ تا ۳/۴۵ در حالت واسنجی گزارش شده است. با توجه به آماره R-factor می‌توان به این نتیجه رسید که عدم قطعیت در نواحی شمالی و غربی حوضه آبریز بیش از مناطق جنوبی است



شکل ۳. باند عدم قطعیت شبیه‌سازی شده حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه توسط مدل واسنجی شده SWAT (باند نارنجی رنگ) و حجم واقعی ورودی به دریاچه (نقاط سیاه رنگ)

تأثیرات بسیار شدیدی بر این حوضه آبریز شده است. لذا در این قسمت سعی شده است که با استفاده از مدل واسنجی شده برای دوره ۱۹۸۰ الی ۱۹۹۱ که نتایج رضایت‌بخشی به همراه داشت و دریاچه ارومیه از لحاظ شرایط اکولوژیک بیشتر به جریان طبیعی خود نزدیک بوده (منظور این است که در این بازه احداث سد ها کم بوده و همچنین وسعت اراضی آبی نیز افزایش نداشته است)، استفاده گردد تا تأثیر شرایط جدید و تغییرات اعمال شده بر روی رواناب ورودی به دریاچه مشخص گردد. بدین منظور مدل واسنجی شده به صورت سالانه در بازه زمانی ۱۹۹۹ الی ۲۰۰۷ اجرا گردید. در شکل ۳ باند عدم قطعیت شبیه‌سازی شده مجموع حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه برای این سال‌ها و مقادیر مشاهده‌ای نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که همواره در طی سالیان شبیه‌سازی حجم ورودی به دریاچه معادل حد پایین عدم قطعیت تخمین زده شده توسط مدل می‌باشد.

همچنین در جدول ۳ مقدار متوسط حجم جریان ورودی به دریاچه در شرایط طبیعی و مقدار واقعی آن آورده شده است. مطابق با این جدول در حدود ۸۰ درصد کاهش حجم جریان ورودی به دریاچه در طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۷ وجود داشته است که این امر می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی همچون تغییرات گسترده کاربری اراضی، احداث سدهای جدید و متعدد باشد. به طوری که قدوسی و همکاران (۶) بیان کردند تغییر کاربری اراضی در زیرحوضه آجی‌چای (در حوضه آبریز ارومیه) نشان دادند که افزایش ۳۰۰ درصدی اراضی آبی و

اعتبارسنجی برای شاخص‌های ناشی‌ساز و ضریب تبیین ( $R^2$ ) به ترتیب برای ایستگاه بستان‌آباد ۰/۸۴ و ۰/۸۴، برای ایستگاه قاسم‌لو ۰/۸۳ و ۰/۸۴ و برای ایستگاه پل صاحب ۰/۸۱ و ۰/۸۱ به دست آمد. مطابق با گزارش موربانی (۱۳) و جدول ۲، نتایج اعتبارسنجی در ۲۵ درصد ایستگاه‌های در حد خیلی خوب و در ۴۵ درصد ایستگاه‌های مورد بررسی مناسب بوده است.

با توجه به نتایج به دست آمده برای قسمت اعتبارسنجی که برای دوره آماری ۱۹۹۲ الی ۱۹۹۸ انجام پذیرفته است مشاهده می‌گردد که در اکثر ایستگاه‌ها آماره P-factor قابل قبول و بالا می‌باشد و همچنین اکثر مقادیر به دست آمده برای آماره R-factor کوچکتر از یک می‌باشند. با بررسی ضریب تبیین و آماره نش‌ساز می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی جریان به خوبی انجام گرفته است و مدل توانایی پیش‌بینی رخدادهای آینده را در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارا می‌باشد به طور کلی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی به دست آمده برای کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه بسیار رضایت‌بخش می‌باشد و می‌توان از نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT در پیش‌بینی و بررسی سایر پارامترهای هیدرولوژیک این حوضه آبریز نیز استفاده نمود.

**بررسی تأثیر شرایط اخیر بر رواناب ورودی به دریاچه ارومیه**  
با توجه به این‌که دخالت‌های انسان در سال‌های اخیر در حوضه آبریز ارومیه، معمولاً با تغییرات کاربری اراضی و احداث سدها و انحراف و برداشت از رودخانه‌ها همراه بوده است، سبب



جدول ۳ مقدار متوسط حجم جریان ورودی به دریاچه در شرایط طبیعی (شبیه‌سازی شده) و حجم واقعی جریان ورودی به دریاچه در سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۷

سال	۱۹۹۹	۲۰۰۰	۲۰۰۱	۲۰۰۲	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷
حجم جریان ورودی پیش‌بینی شده به دریاچه ارومیه در شرایط جریان طبیعی (میلیون مترمکعب)	۱۶۹۵/۳	۵۲۵۴/۳	۷۷۱۸/۴	۱۰۳۱۶/۱	۱۱۸۱۱/۰	۱۱۵۸۸/۷	۹۵۸۳/۵	۱۱۱۱۶/۵	۹۷۷۵/۲
حجم واقعی جریان ورودی به دریاچه ارومیه (میلیون مترمکعب)	۴۱۰	۲۹۰	۸۳۰	۳۴۰۰	۳۷۰۰	۲۳۵۰	۲۰۰۰	۲۳۰۰	۱۶۵۰
حجم جریان ورودی کاهش یافته (درصد)	۷۵	۹۴	۸۹	۶۷	۶۸	۷۹	۷۹	۷۹	۸۳

حوضه آبریز دریاچه ارومیه که طبیعتاً با افزایش شدید مصرف آب در بخش کشاورزی همراه بوده است کاهش حق‌آبه و کاهش سطح دریاچه ارومیه توجیه‌پذیر است. همچنین افزایش تعداد سدها در این حوضه آبریز، موجب کاهش حجم آب ورودی به دریاچه شده است. به طوری که در زمان اجرای مدل ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۲ تنها دو سد زرينه رود و مهاباد در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به بهره‌برداری رسیده بودند. اما در دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۷ تعداد سدها در این دوره به حدود ۳۶ عدد رسیده است که این عامل باعث کاهش حجم جریان ورودی به دریاچه شده است.

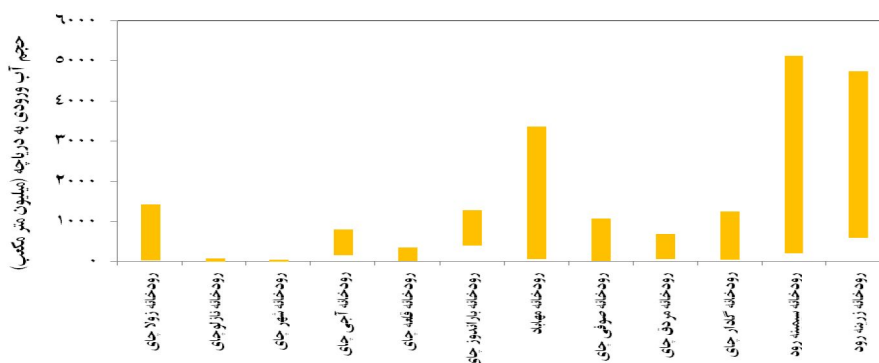
همچنین در شکل ۴ محدوده حداقل و حداکثر و میانگین دبی شبیه‌سازی شده ورودی توسط هر یک از رودخانه‌های دائمی موجود در حوضه آبریز نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ مشاهده می‌شود که از لحاظ تأمین حق‌آبه دریاچه ارومیه رودخانه زرينه رود، سیمینه رود، مهابادچای بیشترین سهم را دارا می‌باشند و هر سه رودخانه از مناطق جنوبی و جنوب‌غربی حوضه آبریز تغذیه می‌شوند و وارد قسمت جنوبی دریاچه می‌گردند.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفت.

کاهش ۴۲ درصدی مراتع از سال ۱۹۷۶ تا سال ۲۰۰۸ سبب گردیده است تا حجم رواناب خروجی از این زیرحوضه به دریاچه ارومیه ۵۱ درصد کاهش یابد. همچنین احمدزاده و همکاران (۱) ورودی به دریاچه ارومیه در حوضه زرينه رود تحت تأثیر تغییر سیستم‌های آبیاری از سطحی به تحت فشار با استفاده از مدل SWAT بررسی کردند نتایج آنها نشان داد که تغییر روش‌های آبیاری سطحی به تحت فشار نمی‌تواند تغییر معنی‌داری در حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه را داشته باشد. بنابراین تغییر نوع سیستم‌های آبیاری نمی‌تواند به‌عنوان یک راه حل برای افزایش حجم آب ورودی به دریاچه بیان گردد.

بنا به گزارش فتحیان و همکاران (۵) تغییر اراضی مرتعی در زیرحوضه‌های شرقی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در خلال سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۱ از ۹۰۰۲ کیلومتر مربع به ۵۹۲۲ کیلومتر مربع کاهش یافته است و این کاهش در حوضه آجی‌چای واقع در شرق دریاچه از شدت بیشتری برخوردار بوده است. از طرفی سطح اراضی زراعی آبی طی مدت ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۱ از ۲۴۹ کیلومتر مربع با ۴۱۲ درصد افزایش به ۱۲۷۵ کیلومتر مربع، اراضی زراعی دیم از ۲۸۶ کیلومتر مربع با ۶۷۲ درصد افزایش به ۲۲۱۰ کیلومتر مربع و اراضی باغی با ۳۳۳ درصد افزایش سطح زیر کشت به ۴۸۵ کیلومتر مربع رسیده است. با توجه به این تغییرات بسیار گسترده در کاربری اراضی



شکل ۴. میانگین سالانه (دوره ۲۰۰۷-۱۹۹۹) باند تخمین عدم قطعیت حجم جریان ورودی به دریاچه ارومیه توسط رودخانه‌های اصلی حوضه آبریز ارومیه

پایین برخوردار بودند. بنابراین امکان استفاده از این مدل برای بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی و احداث سدهای مختلف رواناب ورودی به دریاچه وجود داشت. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که در تمام دوره مورد بررسی (۱۹۹۹-۲۰۰۷) حجم آب واقعی وارد شده به دریاچه ۸۰ درصد نسبت به شرایط طبیعی و نرمال (بدون افزایش سطح زیرکشت و افزایش تعداد سدها) کاهش داشته است که این واقعیت نشان از ضعف مدیریت آب و عدم آینده‌نگری در این حوضه آبریز ارزشمند می‌باشد.

شبیه‌سازی رواناب ماهانه بیان‌گر این بود که پارامتر ضریب منحنی رواناب SCS و تمام پارامترهای مربوط به بارش و ذوب برف از بیشترین حساسیت نسبت به سایر پارامترها برخوردار بودند و شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تمام پارامترهای انتخاب شده به طور مجزا برای اکثر زیرحوضه‌ها بهترین نتایج را برای واسنجی و اعتبارسنجی در پی داشت. در حالت کلی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه آبریز دریاچه ارومیه بسیار رضایت‌بخش بود و نتایج دوره اعتبارسنجی از دقت بالاتری از لحاظ شبیه‌سازی دینامیک جریان و عدم قطعیت

## منابع مورد استفاده

- احمدزاده، ح. س. مرید، م. دل‌آور، ۱۳۹۳. ارزیابی تغییرات عملکرد محصولات کشاورزی و ورودی به دریاچه ارومیه در حوضه زربینه‌رود تحت تأثیر تغییر سیستم‌های آبیاری از سطحی به تحت فشار با استفاده از مدل SWAT. نشریه آبیاری و زهکشی ایران: ۱ (۸): ۱-۱۵.
- اخوان، س. ج. عابدی کوپایی س. ف. موسوی، ک. عباس‌پور، م. افیونی، و س. س. اسلامیان. ۱۳۸۹. تخمین "آب آبی" و "آب سبز" با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان- بهار. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۴ (۵۳): ۲۳-۹.
- بی‌نام. ۱۳۹۱. به‌هنگام‌سازی طرح جامع حوضه‌های مازندران و دریاچه ارومیه. گزارش مطالعات هواشناسی جلد یک.
- رضایی زمان، م. س. مرید، م. دل‌آور، ۱۳۹۲. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیما‌تولوژی حوضه سیمینه‌رود نشریه آب و خاک ۲۷(۶): ۱۲۵۹-۱۲۴۷.
- فتحیان، ف. س. مرید و ص. ارشد. ۱۳۹۲. ارزیابی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از فن‌آوری سنجش از دور و ارتباط آن با روند جریان رودخانه‌ها. نشریه آب و خاک. ۲۷ (۳): ۶۴۲-۶۵۵.

۶. قدوسی، م.، م. دلاور، و . س. مرید ۱۳۹۳. اثر تغییرات کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه آبریز آجی‌چای و ورودی آن به دریاچه ارومیه. تحقیقات آب و خاک ایران ۴۵ (۲): ۱۳۳-۱۲۳.
۷. گودرزی، م.، ب. ذهبیون، ع. ر. مساح‌بوانی و ع. ر. کمال. ۱۳۹۱. مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژیکی SWAT, IHACRES, SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. مدیریت آب و آبیاری. ۲ (۱): ۴۰-۲۵.
8. Abbaspour, K. C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 333 (2-4): 413-430.
9. Abbaspour, K. C. 2011. User Manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland <http://www.eawag.ch/forschung/siam/software/swat/index> [Last accessed August 2012].
10. Akhavan, S., J. Abedi S. F. Mousavi, and K. Abbaspour, 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar watershed, Iran. *Agr. Ecosyst. Environ.* 139: 675-688.
11. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. R. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *J. Am. Water Resour. As.* 34(1): 73-89.
12. Faramarzi, M., K. C. Abbaspour, R. Schulin, and H. Yang. 2009. Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrol. Process.* 23: 486-501.
13. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guideline for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. *T. ASABE* 50(3), 885-900.
14. Murty, P. S., A. Pandey, and S. Suryavanshi. 2014. Application of semi-distributed hydrological model for basin level water balance of the Ken basin of Central India. *Hydrol. Process.* 28(13), 4119-4129.
15. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King. 2009. Soil and water assessment tool, theoretical documentation. College Station, Texas.
16. Schuol J., K. C. Abbaspour, H. Yang, R. Srinivasan, and A. J. B. Zehnder. 2008. Modelling blue and green water availability in Africa. *Water Resour. Res.* 44: 1-18.
17. Setegn, S. G. 2010. Modeling hydrological and hydrodynamic processes in lake Tana basin, Ethiopia. PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden.