شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد با استفاده از مدل SWAT

سپیده دولت آبادی[۱]، * سید محمد علی زمردیان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۱۷

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های آبی

چکیده

مدیریت صحیح حوضه‌های آبریز کشور به عنوان یکی از مهمترین روش‌های استفاده بهینه از منابع آب مطرح می‌شود. در این راستا عقیده بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی در حوضه‌ها می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای باشد. در این تحقیق از مدل SWAT، برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد واقع در استان فارس استفاده شد. در ابتدا رواناب حوضه طی سال‌های آماری ۲۰۱۰-۱۹۹۴ در مدل SWAT شبیه‌سازی گردید. سپس نتایج با استفاده از اندازه‌گیری‌های دبی در ایستگاه دهرود و روش SUFI-2 در نرم‌افزار SWAT-CUP مورد آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت قرار گرفت. مدل در بازه زمانی ۲۰۰۶-۱۹۹۸ واسنجی گردید و سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۷ جهت اعتبارسنجی مدل به کار برده شدند. توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب حوضه به کمک پارامترهای P-factor، d-factor، ضریب نش- ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین (R^2) و تابع هدف ϕ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل SWAT ابزار مناسبی در رابطه با شبیه‌سازی شدت جریان رودخانه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، آنالیز حساسیت، حوضه فیروزآباد، مدل SWAT، واسنجی.

[۱] دانشجو کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران ، ۰۹۱۵۳۷۱۳۰۷۶ . mojtaba.abroshan@gmail.com

[۲] *نویسنده مسئول عضوهیات علمی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران ، ۰۹۱۷۱۳۲۳۰۷۶. mzomorod@shirazu.ac.ir

مقدمه

به موازات رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای آب، توزیع ناهمگون زمانی و مکانی آب شیرین به لحاظ کمی از یک طرف و محدودیت‌ها و مشکلات روز افزون کیفی از طرف دیگر، تأمین منابع آب را در بسیاری از کشورهای جهان به خصوص کشورهای خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌ها و چالش‌های قرن حاضر تبدیل نموده است. از این‌رو برای استفاده بهینه از منابع آب، مدیریت صحیح حوضه‌های آبریز کشور مطرح می‌شود که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای مدیریت مناسب آن‌ها باشد. در این راستا مدل‌سازی کامپیوتری در چهاردهه گذشته بطور فزاینده‌ای توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است که دلایل اصلی آن را میتوان ظاهر شدن مدل‌ها و روش‌های جدید، توسعه مؤسسات تحقیقاتی و افزایش تقاضا برای ابزار توسعه یافته، در کنار افزایش فشار بر منابع آب دانست. برای مدیریت حوضه آبریز و جلوگیری از بروز ناسازگاری در اقدامات طراحی شده در سطح حوضه جهت شبیه‌سازی حوضه مورد نظر، به مدلی نیاز است که بتواند حجم وسیع داده‌ها از جمله بارش، توپوگرافی، مرزهای حوضه، خصوصیات خاک و لایه زیرسطحی، کاربری‌اراضی و پوشش‌گیاهی، سیستم‌های انتقال رواناب، سازه‌های مدیریتی موجود، داده‌های موجود کیفی آب و سطح آب زیرزمینی را در شبیه‌سازی بکار برد(Neitsch et al., 2005). بنابراین استفاده از مدلی با جامعیت لازم در شبیه‌سازی حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌های هیدرولوژیکی که برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز مورد استفاده قرار می‌گیرند عموماً به دو گروه یکپارچه (Lumped) و توزیعی (Distributed) تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های یکپارچه قادر به بررسی تغییرات مکانی پارامترها نمی‌باشند و اجرای آن‌ها نیاز به صرف وقت و هزینه زیادی ندارد. در مقابل، مدل‌های توزیعی اغلب به دلیل قابلیت اتصال به GIS قادرند تمامی تغییرات مکانی را لحاظ کرده اما اجرای آن‌ها مخصوصاً در حوضه‌های وسیع بسیار زمان بر خواهد بود. درسال‌های اخیر مدل‌هایی با ماهیت نیمه‌توزیعی ارائه شده‌اند که در شبیه‌سازی حوضه‌های وسیع موفق عمل کرده‌اند. یکی از این مدل‌های نیمه‌توزیعی که در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته، مدل هیدرولوژیکی SWAT است.

SWAT مخفف Soil and Water Assessment Tool است که اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط دکتر جف آرنولد در سرویس تحقیقات کشاورزی آمریکا طراحی و پایه‌گذاری شد. در تحقیقات زیادی با اهداف مختلف از مدل SWAT استفاده شده است که به عنوان نمونه به چند مورد اشاره می‌شود. Jayakrishnan et al. (2005)، برای بررسی سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب در چهار مطالعه موردی از مدل SWAT استفاده کردند. مهمترین مطالعه آن‌ها پروژه مدل واحد هیدرولوژیکی برای ایالات متحده بود، که در آن به‌منظور انجام یک تحلیل در مقیاس ملی جهت ارزیابی تأثیر سناریوهای مختلف مدیریتی روی کیفیت و کمیت آب از SWAT کمک گرفتند و برای وارد کردن تغییرات مکانی بارندگی در فرآیند مدل‌سازی از تلفیق مدل SWAT با داده‌های بارش شبکه‌ی رادار WSR-88D استفاده نمودند. این تحقیق مزیت داده‌های بارش گرفته شده از رادار را در مطالعات توزیعی هیدرولوژیکی و پتانسیل بالای کاربرد SWAT را در تحلیل و پیش‌بینی سیلاب نشان داد.

Abbaspour et al. (2007) با استفاده از مدل SWAT اقدام به شبیه‌سازی تمام پروسه‌های مؤثر بر کمیت آب، رسوب و بارهای مواد مغذی در حوضه تور با مساحتی حدود ۱۷۰۰ کیلومترمربع واقع در شمال‌شرق کشور سوئیس نمودند. Faramarzi et al. (2009) با این دیدگاه که منابع قابل تجدید آب در ایران، از مهمترین اطلاعات در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت ملی می‌باشد از مدل SWAT به‌همراه برنامه SUFI-2 برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل هیدرولوژیکی ایران براساس دبی رودخانه‌ها و عملکرد گندم با درنظرگرفتن فعالیت‌های سدهای بزرگ و شیوه‌های آبیاری استفاده کردند. Jeong et al. (2010)، برای گسترش و آزمایش یک مدل بارش-رواناب زیرساعتی از مدل SWAT استفاده کردند. روال‌های زیرساعتی را روی یک حوضه با مساحت ۱/۹کیلومترمربع نزدیک لاست کریک در شهر آستین (مرکز ایالت تگزاس آمریکا) مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که نسخه زیرساعتیSWAT یک ابزار امیدوارکننده برای مطالعات ارزیابی آلودگی منبع غیرنقطه‌ای است.

به منظور مدیریت بهتر منابع آب و مشخص کردن مناطق بحرانی، ارزیابی توزیع زمانی و مکانی مؤلفه‌های مختلف منابع آب در هر منطقه ضروری به نظر می‌رسد. از طرف دیگر رواناب ایجاد شده در یک حوضه از مهمترین موضوعات در مطالعات هیدرولوژیکی منطقه است، زیرا اکثر فرآیندهای هیدرولوژیکی به‌طور مستقیم و یا غیرمستقیم با آن در ارتباط هستند و به نوعی از آن متأثر می‌شوند. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع و با هدف کمک به مدیریت بهتر منابع آب منطقه، در این پژوهش مدل هیدرولوژیکی حوضه فیروزآباد به کمک مدل نیمه‌توزیعی SWAT تهیه شد که روند مدل‌سازی، نتایج شبیه‌سازی، آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی دبی حوضه، در این مقاله ارائه می‌شود.

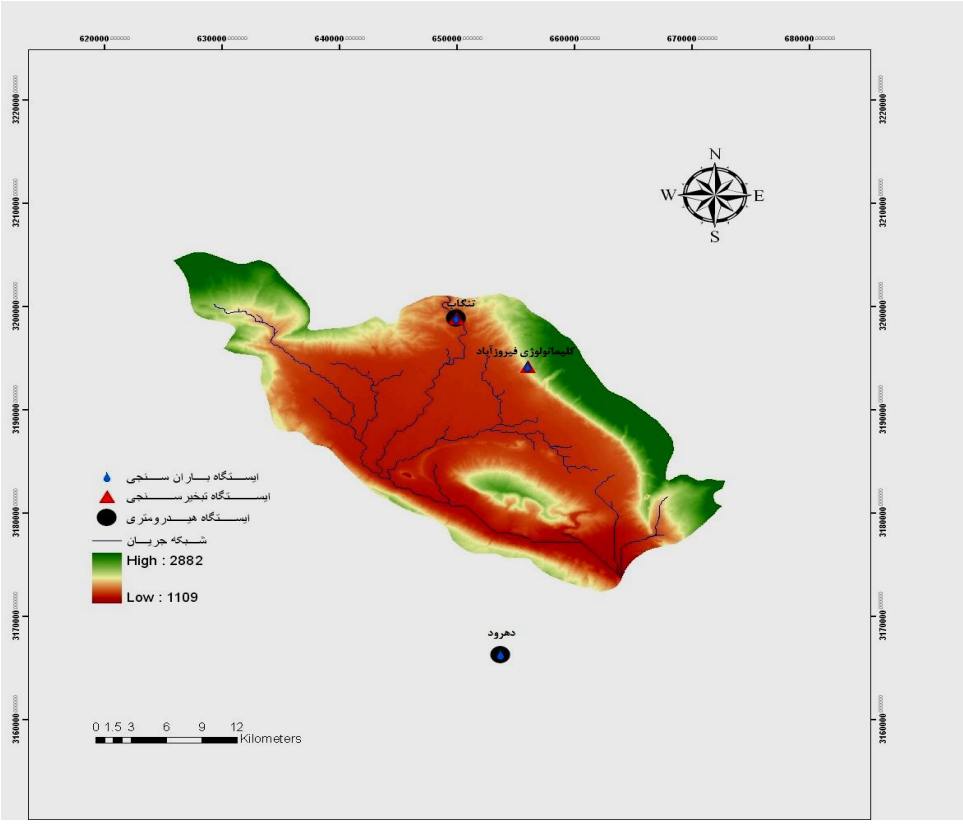
مواد و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز فیروزآباد یکی از حوضه‌های مستعد برای کشاورزی در استان فارس می‌باشد که در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب‌شرقی شهر شیراز قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۵۲ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۲۸ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. وسعت این محدوده ۷۲۳ کیلومترمربع می‌باشد که از این مقدار ۲۴۰ کیلومترمربع دشت و ۴۸۳ کیلومترمربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهد (پولادیان، ۱۳۸۶)(شکل ۱).

۲- مدل SWAT

مدل SWAT مدلی در مقیاس حوضه آبریز می‌باشد که برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی- کشاورزی در سطح حوضه‌های آبریز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری‌اراضی و شرایط مختلف مدیریتی در درازمدت طراحی شده است. برای رسیدن به این اهداف مدل SWAT، مدلی فیزیکی است که به‌جای ضمیمه کردن روابط رگرسیونی برای تشریح روابط بین متغیرهای ورودی و خروجی، مدل نیازمند اطلاعاتی در مورد آب‌وهوا، مشخصات خاک، توپوگرافی، پوشش‌گیاهی و روش‌های مدیریت و کاربری اراضی در سطح حوضه می‌باشد (Neitsch et al., 2005).



فرآیندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوب، رشد گیاه، چرخه مواد مغذی در این مدل به‌طور مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند. مزایای این روش آن است که ۱- حوضه‌های فاقد داده‌های برداشت شده (اطلاعات ایستگاه اندازه‌گیری جریان)، نیز قابل شبیه‌سازی هستند. ۲- تأثیر نسبی اطلاعات ورودی (تغییر در روش‌های مدیریتی، آب‌وهوا، پوشش‌گیاهی) بر روی کیفیت آب و دیگر متغیرهای موردنظر قابل کمی کردن می‌باشند. مدل SWAT از پارامترهای ورودی آسان و قابل دسترس استفاده می‌کند و از نظر محاسباتی بسیار کارآمد است. شبیه‌سازی حوضه‌های بزرگ و پیچیده، با استراتژی‌های مختلف مدیریتی بدون صرف زمان و هزینه زیادی در آن قابل اجرا است. کاربر را قادر به مطالعه بلندمدت تأثیرات می‌کند. بسیاری از فرآیندهایی که اینک مدنظر کاربر هستند، شامل تجمع تدریجی آلاینده‌ها و تأثیر آب‌های پایین‌دست نیز می‌شوند که برای مطالعه این مسائل، خروجی‌های مدل باید چندین دهه را شامل شوند (Neitsch et al., 2005).

برای اهداف شبیه‌سازی در این مدل، یک حوضه به تعدادی زیرحوضه و زیرحوضه‌ها به تعدادی واحدهای کوچکتر (واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، *HRU*) تقسیم می‌شوند. استفاده از زیرحوضه‌ها در شبیه‌سازی، به‌خصوص زمانیکه مناطق مختلف حوضه دارای خاک با کاربری‌های گوناگون هستند که ناهمگنی و تفاوت آن‌ها می‌تواند در هیدرولوژی حوضه تأثیر داشته باشد، بسیار مفید است. واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUها)، اراضی یکپارچه‌ای هستند که دارای ترکیبات یکسانی از پوشش، خاک و مدیریت می‌باشند (Neitsch et al., 2005).

بدون توجه به نوع مسئله‌ای که توسط مدل SWAT مطالعه می‌شود، بیلان آب، نیروی محرک هر پدیده‌ای است که در سطح حوضه رخ می‌دهد. برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل روش‌های متعددی وجود دارد، که سه روش پنمن- مونتیث، پریستلی- تایلور و روش هارگریوز در مدل گنجانده شده است. روندیابی جریان نیز می تواند با دو روش ذخیره متغیر و ماسکینگام و رواناب سطحی با روش شماره منحنی اصلاح شده محاسبه شود (Neitsch et al., 2005). در این مطالعه از ویرایش SWAT2009 که دارای یک برنامه الحاقی در نرم‌افزار ArcGIS به نام ArcSWAT 2.3.3a می‌باشد، استفاده شده است.

اطلاعات ورودی و آماده‌سازی مدل

اطلاعات و داده‌های اساسی مدل شامل: نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری‌اراضی، نقشه خاک، داده‌های هواشناسی از قبیل بارندگی و حداقل و حداکثر درجه حرارت روزانه و دبی رودخانه در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه جهت انجام مراحل واسنجی می‌باشد. در این تحقیق از نقشه مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر استفاده شده است. برطبق نقشه کاربری‌اراضی تهیه شده توسط مرکز GIS دانشگاه شیراز، ۹ طبقه کاربری‌اراضی در منطقه شناسایی گردید. برای وارد کردن اطلاعات خاک، نقشه جهانی فائو مورد استفاده قرار گرفت که براساس آن، ۴ کلاس بافت خاک در حوضه تشخیص داده شد. اطلاعات بارندگی منطقه از سه ایستگاه تنگاب، کلیماتولوژی فیروزآباد و دهرود و اطلاعات درجه حرارت از دو ایستگاه تنگاب و کلیماتولوژی فیروزآباد دریافت گردید. از آنجایی که برای انجام واسنجی باید حداقل یک ایستگاه هیدرومتری در خروجی حوضه وجود داشته باشد، ولی تنها ایستگاه هیدرومتری حوضه، تنگاب بود که تقریباً در ورودی حوضه قرار داشت. با بررسی ایستگاه‌های هیدرومتری حومه‌ی حوضه، تنها ایستگاه مناسب جهت استفاده از اطلاعات آن برای انجام واسنجی، ایستگاه هیدرومتری دهرود تشخیص داده شد که از طرفی نزدیک‌ترین ایستگاه به خروجی بود و از طرف دیگر روی رودخانه فیروزآباد قرار داشت. بنابراین طبق مطالب گفته شده، برای استفاده از این ایستگاه حوضه بزرگ شد به‌طوری که ایستگاه دهرود در خروجی حوضه قرار بگیرد.

پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه و تهیه فایل‌های ورودی، مراحل اجرای مدل به ترتیبی که تشریح می‌شود انجام شد. ۱- در مرحله‌ی اول با وارد کردن نقشه مدل رقومی ارتفاع و تعیین حداقل مساحت دلخواه توسط کاربر حوضه به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود که رابط ArcSWAT برای هر زیرحوضه مشخصات فیزیکی از قبیل: مساحت، طول آبراهه اصلی، شیب و غیره را تعیین می‌کند. بر این اساس منطقه مورد مطالعه به ۷۹ زیرحوضه تقسیم شد. ۲- وارد کردن نقشه کاربری‌اراضی و خاک و اطلاعات شیب که روی‌هم‌اندازی آن‌ها منجر به تولید واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی می‌شود. می‌توان حوضه را به چندین طبقه شیب تقسیم‌بندی کرد. بنابراین سه طبقه شیب در حوضه تعریف شد که شامل ۰ تا ۵ درصد، ۵ تا

۱۵ درصد و بیش از ۱۵ درصد می‌باشند. ۳- همان‌طور که اشاره شد مدل SWAT برای اجرا به داده‌های هواشناسی نیاز دارد. مدل دارای مولد داده‌های اقلیمی (Weather Generator) WXGEN (Sharpley and Williams, 1990) می‌باشد که از آن، جهت تولید داده‌های روزانه و بازسازی آمار مفقود شده استفاده می‌شود. ایستگاهی که در این قسمت به مدل معرفی می‌گردد باید دارای آمار بلندمدت از تمامی پارامترهای هواشناسی از قبیل: بارندگی، حداقل و حداکثر درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی باشد که در کشور ما محدود به ایستگاه‌های سینوپتیک می‌باشند. ایستگاه سینوپتیک فیروزآباد به دلیل تازه تأسیس بودن، فاقد آمار بلندمدت بود بنابراین با بررسی ایستگاه‌های مجاور محدوده، تنها ایستگاه سینوپتیک که از طرفی دارای شرایط آب‌وهوایی مشابه با منطقه مورد مطالعه و از طرف دیگر دارای آمار بلندمدت باشد ایستگاه سینوپتیک شیراز بود که برای این امر به مدل معرفی شد.لازم به یادآوری است که این ایستگاه تنها زمانی در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در اطلاعات ایستگاه‌های بارندگی و درجه حرارت با داده‌های مفقود شده روبرو گردد. برای اطلاعات بارندگی و درجه حرارت از ایستگاه‌هایی که قبلاً معرفی شدند، استفاده گردید. ۴- برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل روش هارگریوز و روندیابی جریان از روش ماسکینگام استفاده شد.

۳- آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

شناسایی پارامترهایی که بر نتایج خروجی مدل مؤثر می‌باشند ضروری است، که از آن تحت عنوان آنالیز حساسیت یاد می‌شود. انجام آنالیز حساسیت که منجر به شناخت پارامترهایی می‌شود که مدل نسبت به دقت آن‌ها حساسیت بیشتری نشان می‌دهد در مدل‌های نیمه‌توزیعی مانند SWAT که تعداد پارامترها زیاد هستند، سبب می‌گردد که در زمان انجام عملیات واسنجی صرفه‌جویی شده زیرا تنها پارامترهایی که در مرحله‌ی آنالیز حساسیت مشخص می‌گردند در واسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از آنجایی که عمل واسنجی شامل تصحیح پارامترهای تأثیرگذار بر روی نتایج مدل است به طوری که از یک طرف خروجی‌های مدل تا حد امکان به داده‌های اندازه‌گیری شده منطبق شود و از طرف دیگر نتایج آن با معیارهای عملکردی که قبلاً برای مدل تعیین شده متناسب باشند. لذا واسنجی احتیاج به تغییر مکرر مقدار پارامترها و اجرای برنامه دارد، استفاده از یک برنامه واسط برای انجام خودکار مراحل کار ضروری است، که بدین منظور برنامه واسط به نام SWAT-CUP تدارک دیده شده است (Abbaspour, 2011). در این مطالعه روش SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2) در نرم‌افزار SWAT-CUP به کار رفت. روش SUFI-2، تمام عدم‌قطعیت‌ها شامل عدم‌قطعیت ورودی‌ها (مانند بارندگی)، مدل مفهومی، پارامترها و داده‌های اندازه‌گیری شده را در مدل‌سازی در نظر می‌گیرد. سنجش میزان عدم‌قطعیت که در برگیرنده تمام موارد اشاره شده‌ی فوق می‌باشد، توسط معیاری به نام P-factor که بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که درون باند عدم‌قطعیت ۹۵ درصد (95PPU) قرار می‌گیرند، صورت می‌گیرد. معیار 95PPU با محاسبه مقادیر متناظر احتمال ۲/۵ درصد به عنوان حدپایین و ۹۷/۵ درصد به عنوان حد بالا، با استفاده از نمونه برداری به روش لاتین هایپرکیوب و حذف ۵ درصد شبیه‌سازی‌های بسیار بد، به دست می‌آید. از آنجایی که اثر تمام عوامل عدم‌قطعیت در متغیر اندازه‌گیری شده منعکس می‌شوند، P-factor معیار مناسبی برای سنجش قدرت آنالیز عدم‌قطعیت انجام شده می‌باشد. فاکتور دیگری که در برآورد قدرت واسنجی و تحلیل عدم‌قطعیت به کار می‌رود، d-factor می‌باشد. d-factor برابر است با فاصله متوسط بین حد بالا و پایین در طیف ۹۵ درصد (95 Percent Prediction Uncertainty) 95PPU، تقسیم بر انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده. بنابراین در SUFI-2 هدف در بر گرفتن بیشترین مقادیر مشاهده شده با کمترین ضخامت باند می‌باشد. شرایط ایده‌آل در یک شبیه‌سازی زمانی است که مقدار P-factor، به یک و d-factor، به صفر نزدیک باشد (Abbaspour, 2011).

به‌منظور مقایسه خروجی مدل با دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری دهرود تابع هدف ϕ بر طبق معادله‌ی زیر مورد استفاده قرار گرفت:

$$\phi = \begin{cases} |b|R^2 if\ |b| \le 1 \\ |b|^{-1} R^2 if\ |b| > 1 \end{cases} \qquad (۱)$$

که در آن R^2 ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده و b شیب خط رگرسیون بین آن‌ها می‌باشد (Abbaspour, 2011). پس از اتمام مرحله‌ی واسنجی، مدل مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد. اعتبارسنجی شبیه واسنجی است که در آن داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل در یک سری زمانی متفاوت از دوره واسنجی با واقعیت مقایسه می‌گردد. تنها تفاوت آن با واسنجی این است که هیچ تصحیحی روی پارامترها صورت نمی‌گیرد. در نهایت اعتبارسنجی، اعتمادپذیر بودن مدل واسنجی شده را برای استفاده در داده‌های مستقل و بازه‌های زمانی آینده تعیین می‌کند.

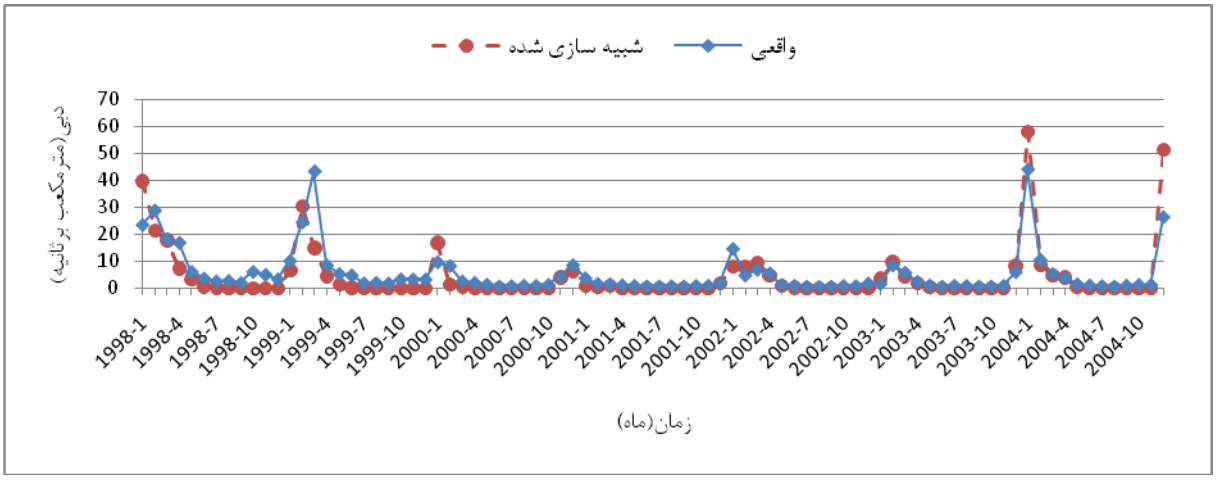
نتایج و بحث

پس از پارامترسازی و ورود داده‌ها، شبیه‌سازی برای یک دوره آماری ۱۷ ساله از ۲۲ دسامبر ۱۹۹۴ تا ۳۱ آگوست ۲۰۱۰ براساس گام زمانی ماهانه صورت گرفت. بازه زمانی ۱۹۹۷-۱۹۹۴ به عنوان warm up در نظر گرفته شد تا مدل با شرایط محیطی متعادل شود. شکل (۲) نتایج برآورد اولیه مدل از شدت جریان در خروجی حوضه را بدون واسنجی نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود، مدل توانسته تا حد زیادی روند تغییرات دبی را در ایستگاه دهرود به خوبی شبیه‌سازی کند، گرچه در بعضی موارد اختلافاتی دیده می‌شود به عنوان مثال در برخی از ماه‌ها دبی اوج در حالت شبیه‌سازی شده چند برابر حالت واقعی بوده، در حالی‌که دقیقاً در ماه بعد از آن هیدروگراف شبیه‌سازی شده منطبق و یا نزدیک به حالت واقعی گردیده است. عوامل بسیاری می‌توانند در این تفاوت‌ها نقش داشته باشند که در مرحله واسنجی قابل رفع هستند مگر آن که مربوط به مدل مفهومی، داده‌های ورودی و داده‌های مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری باشند.

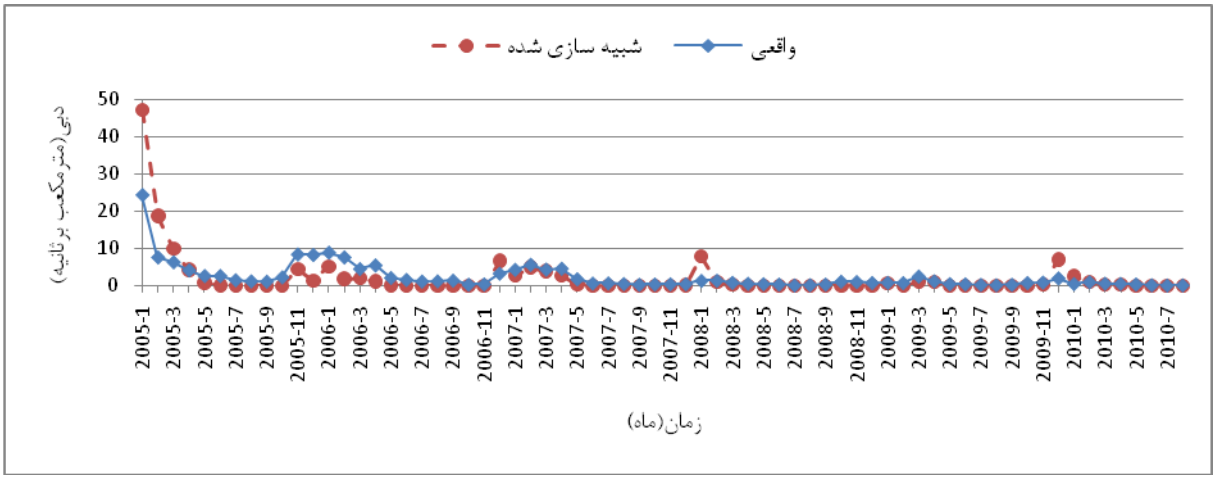
در مرحله‌ی آنالیز حساسیت با بررسی مطالعات گذشته که از مدل SWAT جهت شبیه‌سازی دبی رودخانه استفاده شده بود ابتدا ۳۱ پارامتر که بر روی دبی خروجی از حوضه مؤثر بودند شناسایی شدند. پس از انجام آنالیز حساسیت نسبی، دبی خروجی منطقه مورد مطالعه به ۹ پارامتر حساسیت نشان داد. پارامترهایی که مدل حوضه به آن‌ها حساسیت نشان داد به همراه توضیحات آن‌ها در جدول (۱) آورده شده‌اند.

(الف)



شکل(۲): نتایج اولیه شبیه‌سازی دبی در خروجی حوضه (الف): بازه زمانی ۲۰۰۴-۱۹۹۸، (ب): بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۵

(ب)



ادامه شکل(۲): نتایج اولیه شبیه‌سازی دبی در خروجی حوضه (الف): بازه زمانی ۲۰۰۴-۱۹۹۸، (ب): بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۵

جدول(۱): نتایج آنالیز حساسیت مدل

نام پارامتر در مدل	توضیحات
ESCO.hru	ضریب تصحیح تبخیر از خاک
CH_N1.sub	ضریب مانینگ جریان آبراهه‌ای در هر حوضه
GWQMN.gw	حداقل مقدار ذخیره شده آب در آبخوان که برای رخ دادن جریان پایه لازم است (میلیمتر)
CH_N2.rte	ضریب مانینگ آبراهه اصلی هر حوضه
ALPHA_BF.gw	ضریب عکس‌العمل جریان آب‌زیرزمینی (روز)
RCHRG_DP.gw	درصد تغذیه آبخوان عمیق
SOL_AWC().sol	ظرفیت آب قابل دسترس خاک (میلیمتر آب/میلیمتر خاک)
SOL_Z().sol	عمق لایه‌های خاک (میلیمتر)
CN2.mgt	شماره منحنی رواناب در شرایط رطوبتی متوسط

با استفاده از این ۹ پارامتر و مقادیر دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری دهرود، مقادیر دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل در طول سال‌های آماری ۲۰۰۶-۱۹۹۸ واسنجی گردید. به منظور تحلیل کیفیت نتایج واسنجی مدل علاوه بر مقادیر ۳ شاخص تابع هدف ϕ، P-factor و d-factor از ۲ شاخص ضریب تعیین (R^2) و ضریب نش- ساتکلیف (NS) نیز استفاده شد. ضریب تعیین نشان می‌دهد خط رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه میزان به بیشترین مقدار هماهنگی بین این دو سری نزدیک است و از صفر تا یک تغییر می‌کند. ضریب نش- ساتکلیف نشان می‌دهد که خط رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱ نزدیک است و مقدار آن از منفی بینهایت تا ۱ متغیر می‌باشد.

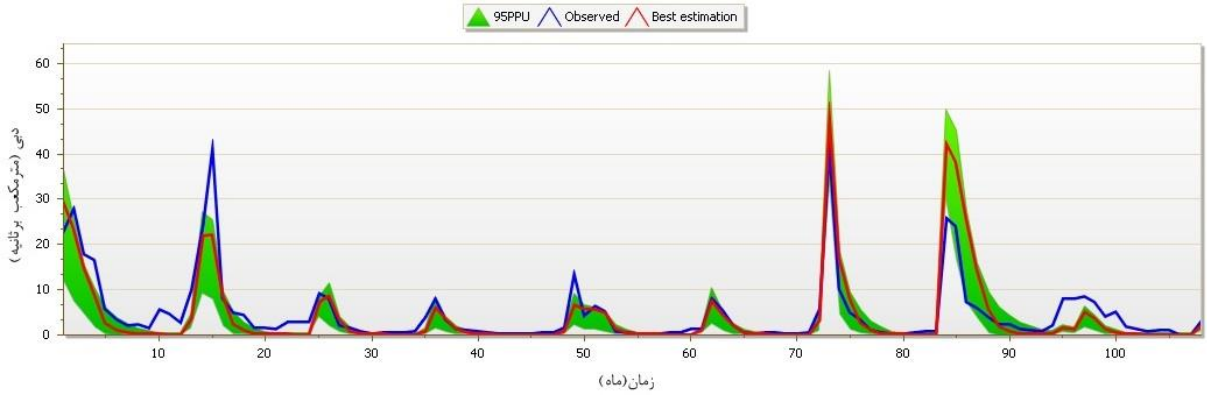
روابط مربوط به این دو شاخص به صورت زیر است:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i \left(Q_{m,i} - \overline{Q}_m\right)\left(Q_{s,i} - \overline{Q}_s\right)\right]^2}{\sum_i \left(Q_{m,i} - \overline{Q}_m\right)^2 \sum_i \left(Q_{s,i} - \overline{Q}_s\right)^2} \qquad (۲)$$

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

در این رابطه‌ها $Q_{m,i}$ مقادیر دبی اندازه‌گیری شده، $Q_{s,i}$ مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل، $\overline{Q}_m$ و $\overline{Q}_s$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده می‌باشند (Abbaspour, 2011). تاکنون هیچ معیار خاصی در مورد مقادیر مناسب برای پارامترهای ضریب تعیین و نش- ساتکلیف ارائه نشده است. اما Moriasi et al. (2007) پیشنهاد می‌کنند که مقادیر NS در مطالعات هیدرولوژیک و همچنین فرآیندهای مربوط به انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه باید از ۰/۵ بزرگتر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول قلمداد نمود که معمولاً همین معیار برای مقدار پارامتر R^2 نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نتایج واسنجی مدل در بازه زمانی ۲۰۰۶-۱۹۹۸ در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر ۵ شاخصی که به منظور تحلیل کیفیت نتایج واسنجی به‌کار رفتند نیز در جدول (۲) آورده شده‌اند.



شکل(۳): نتایج واسنجی جریان در ایستگاه دهرود

جدول۲: خلاصه نتایج مدل در مرحله واسنجی

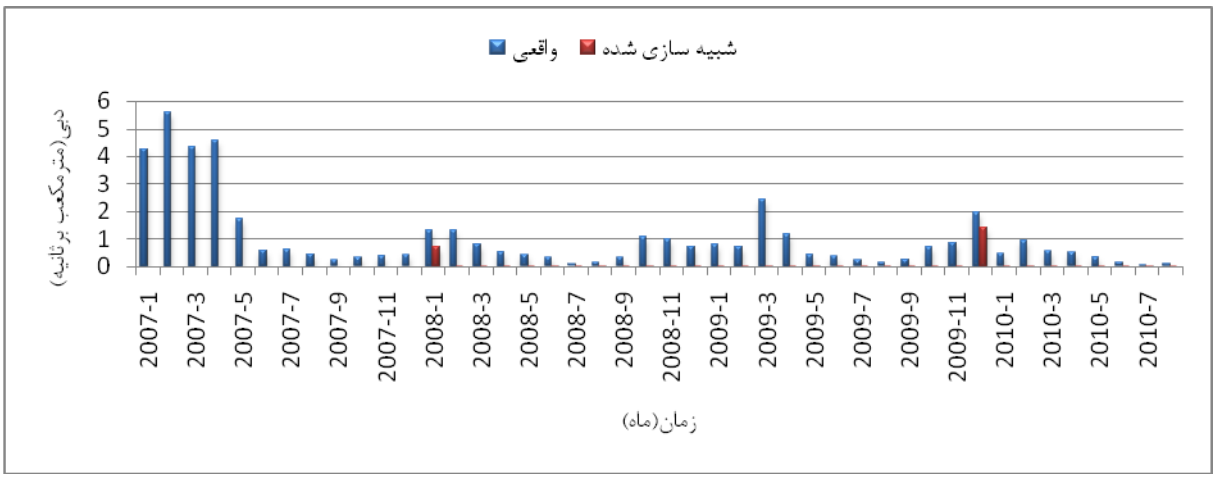
نام ایستگاه	طول دوره آماری	P-factor	d-factor	R^2	NS	br^2
دهرود	۹ سال	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۷۷	۰/۷	۰/۷۷۲۳

نتایج واسنجی نشان می‌دهد که مدل همبستگی مناسبی را با داده‌های اندازه‌گیری شده شدت جریان رودخانه فیروزآباد در محل ایستگاه دهرود نشان می‌دهد. شکل (۳) گویای این مسئله است که مدل در اکثر ماه‌های سال انطباق خوبی را با داده‌های اندازه‌گیری نشان داده، از طرفی چون نقاط پیک برای مطالعات رودخانه نقاط حساسی هستند و مدل در شناسایی زمان رخ دادن این نقاط تقریباً خوب عمل کرده اما در اغلب موارد دبی را بالاتر از مقدار اندازه‌گیری شده نشان داده که این مسئله برای مدل ضعف محسوب نمی‌شود زیرا می‌تواند به‌عنوان یک ضریب اطمینان در زمان به‌وقوع پیوستن سیلاب در نظر گرفته شود. درشکل (۳) نقاطی مشاهده می‌شود (آوریل ۱۹۹۸، ژانویه و مارس ۱۹۹۹ و ژانویه۲۰۰۲) که مدل جریان‌های حداکثر را کمتر از حد واقعی تخمین زده است. مدل SWAT، براساس متوسط دمای روزانه، بارش را به دو صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است مدل در شبیه‌سازی ذوب برف ضعیف عمل کرده و جریانات حداکثر را خوب شبیه‌سازی نکرده باشد (Fontaine et al., 2002).

در مرحله‌ی بعد مدل واسنجی شده در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۷ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی در شکل (۴) و جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول۳: خلاصه نتایج مدل در مرحله اعتبارسنجی

نام ایستگاه	طول دوره آماری	P-factor	d-factor	R^2	NS	br^2
دهرود	۴ سال	۰/۴۱	۰/۳۵	۰/۰۱	-۰/۵۷	۰/۰۰۰۳



شکل(۴): نتایج اعتبارسنجی مدل در ایستگاه دهرود

کیفیت برازش مدل در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی تا اندازه‌ای کاهش یافته است. قرار گرفتن زمان آبگیری سد مخزنی تنگاب در دوره اعتبارسنجی که قطعاً اعمال شرایط مدیریتی آن بر روی دبی رودخانه فیروزآباد اثر گذاشته است. همانطور که از مقایسه شکل‌های (۳) و (۴) مشهود است دبی اندازه‌گیری شده رودخانه در دوره اعتبارسنجی نسبت به دوره واسنجی به نسبت زیادی کاهش داشته است. بنابراین اگر خشکی یا کم‌آبی یک حوضه یا قسمتی از آن جزء خصوصیات دائمی آن محسوب نشود در شرایطی که در مرحله واسنجی مدل از مقادیر پایین شدت جریان اندازه‌گیری شده استفاده نشده باشد مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق شدت جریان در دوره‌ی کم‌آبی نخواهد بود. از طرف دیگر، به‌طور کلی مدل‌های شبیه‌سازی حوضه آبریز عملکرد ضعیفی در برآورد مقادیر کم جریان از خود نشان می‌دهند. این مشکل را می‌توان به ساده‌سازی‌های این گونه مدل‌ها در شبیه‌سازی و تعامل پیچیده بین رواناب و جریان زیرسطحی در وقایع بارندگی با ارتفاع کم دانست (Hantush and Kalin, 2005). این دلایل و مواردی که در دوره واسنجی به آن‌ها اشاره شد از جمله عواملی هستند که به نظر می‌رسد بر روی این کاهش کیفیت اثر داشته‌اند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی متوسط ماهانه رواناب حوضه فیروزآباد در استان فارس از مدل نیمه‌توزیعی SWAT، در محیط ArcGIS، و نیز از روش SUFI-2 در برنامه SWAT-CUP به‌طور موفقیت‌آمیزی استفاده شد. از محدودیت‌های این مطالعه می‌توان به مواردی چون معرف نبودن ایستگاه‌های هواشناسی، تعداد کم ایستگاه‌ها در مقایسه با سطح وسیع حوضه، وجود ارقام از قلم افتاده در آمار هواشناسی، و جدید التأسیس بودن ایستگاه سینوپتیک فیروزآباد، که برای بهره گرفتن از مولد داده‌های اقلیمی به اجبار از ایستگاه سینوپتیک شیراز استفاده شد اشاره نمود. همچنین یکی از دلایل ضعف مدل در تخمین حداکثر جریان رواناب، استفاده از فرمول SCS در محاسبه رواناب است زیرا SCS نمی‌تواند به خوبی رواناب حاصل از ذوب برف را شبیه‌سازی نماید. در مجموع، با توجه به محدودیت‌های مدل و کمبود اطلاعات نتایج شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه دهرود رضایت‌بخش بود.

منابع

۱- پولادیان، ع. ۱۳۸۶. گزارش توجیهی پیشنهاد تمدید ممنوعیت منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی فیروزآباد، معاونت مطالعات پایه منابع آب، مدیریت آب‌های زیرزمینی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس.

2-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 (2-4), 413-430.

3-Abbaspour, K. C. (2011). *User Manual for SWAT-CUP4, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, from http://www.eawag.ch.

4-Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R. and Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes*, 23, 486–501.

5-Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S., Arnold, J. G. and Hotchkiss, R. H. (2002). Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *Journal of Hydrology*, 262 (1-4), 209-223.

6-Hantush, M. M. and Kalin, L. (2005). Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (6), 1151-1172.

7-Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santhi, C. and Arnold, J. G. (2005). Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes*, 19, 749–762.

8- Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J., Glick, R., Gosselink, L. and Srinivasan, R. (2010). Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model. *Water Resources Management*, 24 (15), 4505-4527.

9-Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*,50 (3), 885-900.

10-Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Willams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation*. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 494 p. from www.brc.tamus.edu.

11-Sharpley, A. N. and Williams, J. R. (1990). EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.

Hydrological Simulation of Firoozabad Basin By SWAT

S. Dowlatabadi[1], S. M. A. Zomorodian [2]

Abstract

Management of watershed basins of the country as one of the most important ways by optimal use of water resources is considered. In this regard, it is believed that a simulation of hydrological phenomenon of basin seems to be the way is the optimal solution. In this research, SWAT model, for the simulation of the hydrological basin of Firoozabad in Fars Province were used. The first statistical runoff during 1994-2010 simulated by SWAT model. Then the results by using discharge measurement of at Dehrood station and method of SUFI-2 in SWAT-CUP software, sensitivity analysis, calibration, validation and uncertainty analysis were done. The years 1998-2006 model years of calibration and 2010-2007 for validation were used. Ability of the SWAT model to simulate runoff modeling by using parameters P-factor, d-factor, Nash-Sutcliffe (NS) factor, coefficient of determination (R^2) and the objective function ϕ was studied. The results showed that the SWAT model is a suitable simulation tool in discharge simulation of river.

Keywords: SWAT model, Firoozabad basin, calibration, sensitivity analysis, validation.