

## مقایسه داده‌های بارش ماهواره‌ای و ایستگاه‌های هواشناسی در شبیه‌سازی رواناب ماهانه رودخانه کلم با استفاده از مدل SWAT

مهدی تیموری<sup>۱</sup>، اسداله خورانی<sup>۲\*</sup> و مسعود بختیاری<sup>۳</sup> کیا

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد سنجش از دور، گروه علوم جغرافیایی، دانشگاه هرمزگان، <sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم جغرافیایی، دانشگاه هرمزگان و <sup>۳</sup> استادیار، گروه علوم جغرافیایی، دانشگاه هرمزگان

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۹

### چکیده

برآورد دقیق رواناب یک عملیات محوری در زمینه مدیریت منابع آب محسوب می‌شود و پیش‌بینی آن برای بهره‌برداری مطلوب از یک سامانه هیدرولوژیکی نقش مهمی دارد که معمولاً انجام این مهم با توسل به مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی صورت می‌گیرد. محاسباتی مانند شدت و مدت که برای بارش متداول است، در بیشتر نقاط جهان، برای تعیین خصوصیات کلی بارش کافی نمی‌باشند، زیرا محاسبات بارش از روی مشاهدات زمینی به صورت نقطه‌ای انجام می‌شود، در حالی که بارش خود یک پدیده سطحی است. در تحقیق حاضر، از داده‌های بارش سنجش از دور و ایستگاه هواشناسی و مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه حوزه آبخیز کلم در استان هرمزگان استفاده شد. برای اجرای مدل هیدرولوژیکی در ابتدا داده‌های لازم شامل داده‌های بارش ایستگاه هواشناسی، بارش ماهواره TRMM و بارش پایگاه بارشی GPCP، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع خورشیدی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ از تارنما و ایستگاه‌های مورد نظر استخراج شد، همچنین، نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و مدل رقومی ارتفاعی منطقه متناسب در قالب مدل تهیه شدند. از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹ برای واسنجی و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ برای صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی در نظر گرفته شد. در نهایت مقادیر پارامتر نش-ساتکلیف و ضریب تعیین در دوره واسنجی برای ایستگاه هواشناسی، ماهواره TRMM و GPCP به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۴۱، ۰/۳۲، ۰/۵۱، ۰/۴۴ و ۰/۳۷ و در دوره صحت‌سنجی برابر ۰/۴۱، ۰/۵۲، ۰/۱۰، ۰/۴۳، ۰/۷۱ و ۰/۱۹ برآورد شد. این نتایج حاکی از آن است که مدل داده‌های ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM را رضایت‌بخش و قابل قبول شبیه‌سازی کرده اما در مورد پایگاه بارشی GPCP شبیه‌سازی به خوبی صورت نگرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای، بندرعباس، حوزه آبخیز رودخانه کلم، ماهواره TRMM، نش-ساتکلیف

### مقدمه

اصولی از این منابع، باعث بروز مشکلات و اختلافات روز افزونی در خصوص مدیریت منابع آب شده است. مدل‌سازی در هیدرولوژی باعث درک بهتر چرخه هیدرولوژی در مقیاس حوزه‌های آبخیز شده، این امر

محدودیت منابع آب و افزایش نیاز به آب که ناشی از افزایش جمعیت، توسعه شهرها، سیاست‌های جدید مدیریت جوامع بشری و نیز استفاده بی‌رویه و غیر

باشند، از این رو، برآوردهای بارش ماهواره‌ای که نواحی مختلف سطح زمین را پوشش می‌دهند، می‌توانند جایگزین مناسبی برای ایستگاه‌های باران‌سنجی باشند (Moazami و همکاران، ۲۰۱۳). برای استفاده از این سری داده‌ها ابتدا لازم است که کیفیت و ویژگی‌های خطای آن‌ها در مکان‌های مختلف ارزیابی شود، بنابراین، برآورد بارش با استفاده از ماهواره‌ها مرجع بسیار مهمی برای دستیابی کامل‌تری از بارندگی و منابع آب در کشور ایران که ایستگاه‌های باران‌سنجی آن بسیار پراکنده‌اند، است (Barani Zadeh و همکاران، ۲۰۱۱). شبیه‌ساز مورد استفاده در این تحقیق، مدل<sup>۱</sup> SWAT می‌باشد. این مدل، یک مدل هیدرولوژیکی نیمه فیزیکی و نیمه توزیعی است که به‌طور گسترده‌ای در دنیا به‌کار گرفته شده و قادر است ارزیابی دقیقی در مبحث مدیریت منابع آب را ارائه نماید و در حوزه‌های آبخیزی که فاقد آمار برداری منظمی هستند، قابل استفاده است. این مدل از داده‌های ورودی قابل دسترس به راحتی استفاده می‌کند. با این مدل بدون سرمایه‌گذاری‌های زیاد زمانی یا مالی می‌توان اثرات طولانی مدت را مطالعه کرد (Arnold و همکاران، ۱۹۹۸). همچنین، الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای شامل ماهواره TRMM که برای به‌دست آوردن برآوردی دقیق‌تر از بارش در پهنه‌های استوایی و مناطق جنب حاره‌ای با قدرت تفکیک ۰/۲۵ استفاده می‌شود و دارای سنجنده‌های رادار بارش (PR)، تصویرساز میکروموج (مایکروویو) (TMI) و اسکنر نور مرئی و مادون قرمز (VIRS) می‌باشد، داده‌های بارش را به‌دلیل قدرت تفکیک مناسب‌تر نسبت به سایر ماهواره‌ها به‌خوبی ثبت می‌کنند و داده‌های ماهواره‌ای پایگاه بارشی GPCP که به‌وسیله برنامه پژوهش اقلیم جهان بنیان نهاده شده تا پراکنش و توزیع ریزش‌های آسمانی را بر پهنه کره زمین طی سال‌های طولانی اندازه‌گیری کند. همه فراورده‌های این پایگاه به کمک یک کاسه کردن و در هم تنیدن داده‌های فروسرخ و مایکروویو و داده‌های بارشی واکاوی شده باران‌سنج-های زمینی، با استفاده از روش‌های ادغام، مانند SGM<sup>۲</sup> که به‌وسیله هافمن و همکاران در سال ۲۰۰۶

در روند توسعه پایدار منطقه تأثیرگذار می‌باشد (Xu, ۲۰۰۳). از آنجا که بیشتر حوزه‌های آبخیز کشور فاقد ایستگاه آب‌سنجی با آمار بلندمدت می‌باشند، استفاده از روش‌هایی که بتوان با کمک آن‌ها اندازه رواناب حاصل از بارندگی را در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار، یا دارای آمار ناقص، تخمین زد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. یکی از این روش‌ها استفاده از شبیه‌سازهای آب‌شناسی در شبیه‌سازی بده جریان است (Najafi, ۲۰۱۰؛ Beven و Binley, ۱۹۹۲). استفاده دقیق و کم‌هزینه برای برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب و خاک به‌منظور برآورد پیامدها، خسارات اولیه و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش خسارات، امری ضروری است. مدل‌سازی یکی از چندین مجموعه ابزار قابل استفاده برای مدیریت منابع آب و خاک است و مدل‌سازی رایانه‌ای در چهار دهه اخیر به‌طور فزاینده‌ای توسعه داده شده، مورد استفاده قرار گرفته است که دلایل اصلی آن را می‌توان ظهور مدل‌های کارآمد و روش‌های جدید به‌وسیله مؤسسات تحقیقاتی، فناوری سنجنش از دور و افزایش تقاضا برای ابزار توسعه یافته، در کنار فشار بر منابع آب و خاک دانست (Feyereisen و همکاران، ۲۰۰۷).

از طرفی، بارندگی کلیدی‌ترین متغیر ورودی در شبیه‌سازی آب‌شناسی بوده، توزیع زمانی و مکانی آن تأثیر قابل توجهی بر جریان‌های سطحی دارد (Li و همکاران، ۲۰۱۳). اطلاع از توزیع زمانی و مکانی بارش و شناخت اثر آن بر بده رود، از مواردی است که منجر به مدیریت صحیح منابع آب در یک حوزه آبخیز خواهد شد (Sadeghi و Nourmohammadi, ۲۰۰۶). برای توسعه روش‌های تخمین بارش استفاده از الگوریتم‌هایی با فن سنجنش از دور ماهواره‌ای، در مقیاس جهانی و با توان تفکیک زمانی کمتر از سه ساعته و تفکیک مکانی کوچک‌تر از ۰/۲۵ درجه ارائه شده‌اند به گونه‌ای که امروزه یکی از منابع برآورد بارش در سطح جهانی، محصولات به‌دست آمده از الگوریتم‌های برآورد بارش ماهواره‌ای می‌باشد (Katirai Boroujerdy, ۲۰۱۳). ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش بر پهنه خشکی‌ها پراکنده شده‌اند. بنابراین، ایستگاه‌های اندازه‌گیری جهان در نهایت فقط می‌توانند نماینده بارش ۲۵ تا ۳۰ درصد از کره زمین

<sup>1</sup> Soil and Water Assessment Tool

<sup>2</sup> Satellite Gage Model

دارای آمار ناقص داخل کشور باشند. بدین لحاظ، کارایی استفاده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای در شبیه‌سازی رواناب، به‌عنوان ورودی به شبیه‌سازهای آب‌شناسی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است و این فرضیه طرح می‌شود که الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای برای شبیه‌سازی رواناب دارای دقت قابل قبولی هستند. در این تحقیق، ابتدا از داده‌های بارش روزانه ایستگاه هواشناسی، ماهواره TRMM و پایگاه بارشی GPCP به‌عنوان ورودی به مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب رودخانه کلم استفاده شده، سپس برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT از نرم‌افزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI-2 استفاده شد.

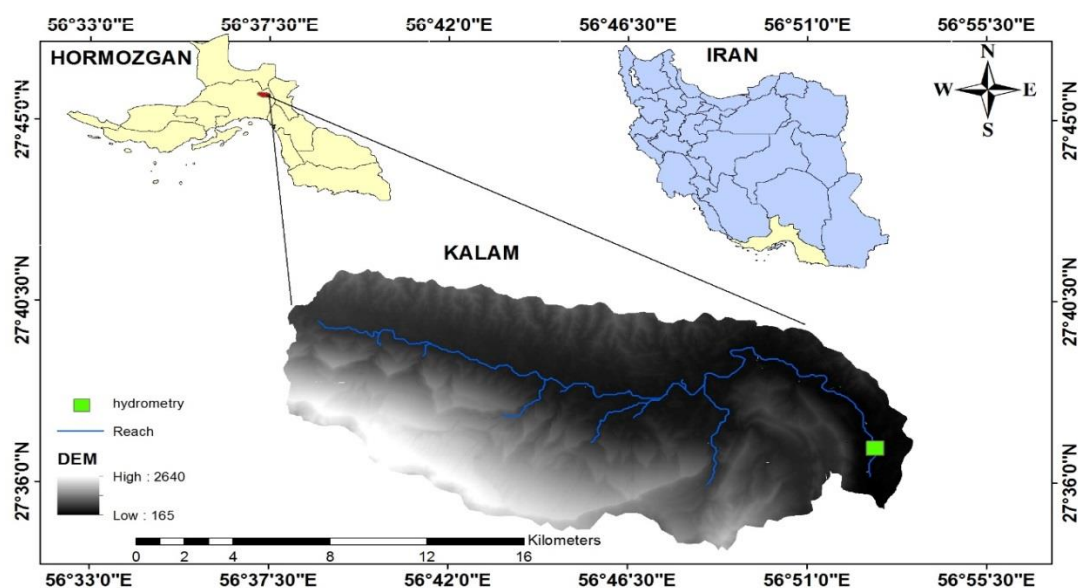
### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** حوزه آبخیز رودخانه کلم با مساحتی حدود ۲۰۸۲۷ هکتار در شمال شرق شهر بندرعباس واقع شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی در ۵۸° ۳۷' تا ۵۶° ۴۰' طول شرقی و ۴۰° ۳۴' تا ۲۷° ۲۷' ۴۱' عرض شمالی قرار دارد. این منطقه عمدتاً متشکل از آبراهه‌ها و رودخانه‌های فصلی می‌باشد که از دو طرف به‌وسیله تپه‌ها و کوه‌ها احاطه شده است. متوسط بارندگی در یک دوره آماری ۲۰ ساله حدود ۳۱۰/۲ میلی‌متر به‌دست آمده است.

### داده‌های مورد استفاده

۱- **داده‌های اقلیمی:** داده‌های اقلیمی شامل مجموع بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی با دوره زمانی ۱۵ ساله هستند که از سازمان آب منطقه‌ای استان هرمزگان دریافت شد. این داده‌ها باید به‌صورت روزانه در قالب فایل‌هایی با فرمت text آماده و وارد مدل شوند. این مدل به‌منظور بازسازی داده‌های مفقود شده اقلیمی، از مولد اقلیمی WGEN (weather generator) که همان نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به حوزه آبخیز است، استفاده می‌کند. در اینجا نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک با دوره آماری بلندمدت و مفقود نشده، به حوزه آبخیز کلم، ایستگاه بندرعباس می‌باشد که برای این منظور استفاده شد.

ساخته شده، ایجاد می‌شوند. تخمین داده‌های بارش با ترکیبی از ماهواره‌های میکروویو DMSP,SSM/I و مادون قرمز GOES, Meteosat, GMS, NOAA به همراه داده‌های بیش از ۶۰۰۰ ایستگاه ثابت زمینی در آزمایشگاه جو ناسا تهیه می‌شود (Yin و Gruber, ۲۰۱۰) استفاده شد. در دو دهه گذشته، استفاده از الگوریتم‌های برآورد بارش ماهواره‌ای به‌منظور اندازه‌گیری بارندگی، رشد چشم‌گیری داشته، تلاش‌های زیادی در زمینه تحقیق در اجرا و محاسبه خطای آن‌ها صورت گرفته است. ترکیب مدل SWAT با داده‌های بارش ماهواره‌ای برای شبیه‌سازی رواناب حوزه‌های آبخیز در مناطق مختلف جهان و در هر نوع آب و هوایی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است که شامل تحقیقات Kenneth و Marvin (۲۰۱۴)، Bitew و Gebremichael (۲۰۱۱)، Zhu و همکاران (۲۰۱۵) و Yu و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد. در تمام تحقیقات فوق، الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای و مدل SWAT برای حوزه‌های آبخیز بزرگ مقیاس به‌کار برده شده، تحقیقی مبنی بر به‌کارگیری این الگوریتم‌ها در حوزه‌های آبخیز کوچک مقیاس صورت نگرفته است. در تحقیقی که Hosseini و همکاران (۲۰۱۷) به برآورد بودجه هیدرولوژیکی در شش حوزه آبخیز خلیج فارس با مدل SWAT پرداختند، برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی مدل، از دو ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده کردند. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده نشان داد که هر مؤلفه مدل، خروجی معقول را نشان می‌دهد و تعامل میان اجزای آن، واقع‌بینانه است. این مطالعه تکنیکی با قابلیت قابل اعتماد، اجزای بودجه سالانه و ماهیانه حوزه آبخیز خلیج فارس را تولید کرده است. تحقیقات داخلی زیادی برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب و غیره با مدل SWAT صورت گرفته که شامل تحقیقات، Hosseini و همکاران (۲۰۱۶ و ۲۰۱۵) و Garizi و همکاران (۲۰۱۷) است. از طرفی، تحقیقی داخلی مبنی بر استفاده از الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای برای جایگزینی ایستگاه‌های باران‌سنجی انجام نشده، این الگوریتم‌ها می‌توانند راهگشای قابل قبولی برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز فاقد آمار یا



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۴- داده ایستگاه هیدرومتری: به منظور واسنجی و مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به وسیله مدل SWAT و ارزیابی در شبیه‌سازی جریان، داده‌های ماهانه جریان (مترمکعب بر ثانیه) ایستگاه هیدرومتری سلوبم با دوره آماری از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ که در خروجی حوزه آبخیز واقع شده است از سازمان آب منطقه‌ای استان هرمزگان اخذ شد.

**روش انجام پژوهش:** شکل ۳ نمایی کلی از روش انجام تحقیق، داده‌های ورودی و نرم‌افزارهای مورد استفاده را نشان می‌دهد.

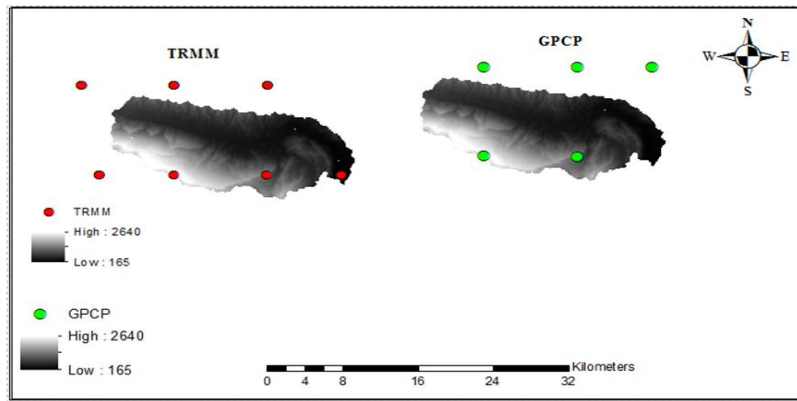
**اجرای مدل SWAT:** برای اجرای کار از نرم‌افزار Arc-SWAT 2012 که به صورت یک الحاقیه به Arc-GIS متصل می‌شود، استفاده شد. ابتدا مدل رقومی ارتفاعی حوزه آبخیز کلم به محیط نرم‌افزار Arc-Map فراخوانده شد. در این مرحله، محدوده آبخیز و زیرحوضه‌ها و خصوصیات فیزیکی آبخیز به وسیله مدل محاسبه شد. سپس، با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، خاک و طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف شدند. برای طبقه‌بندی شیب حوزه آبخیز از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا در پنج طبقه صفر تا پنج، پنج تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰ تا ۴۰ و بیشتر از ۴۰ درصد استفاده شد. در مرحله بعد، داده‌های هواشناسی به مدل وارد شدند.

۲- داده‌های ماهواره TRMM<sup>۱</sup> و پایگاه بارشی GPCP<sup>۲</sup>: داده‌های بارش روزانه الگوریتم‌های ماهواره‌ای شامل ماهواره TRMM با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۵ و پایگاه بارشی GPCP با قدرت تفکیک مکانی یک درجه به صورت جهانی از سال ۱۹۹۶ تا الان در دسترس بوده، دوره زمانی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ از تارنمای APDRC استخراج شد. در این تارنما، داده‌های استخراجی با انواع قالب‌های متنی و رستری موجود می‌باشد که داده‌ها با قالب متنی دریافت شد. با معرفی مختصات جغرافیایی حوزه آبخیز، داده‌ها به صورت درون‌یابی شده و آماده که نیاز به تصحیح نداشتند، دریافت شد و به تعداد نقاطی که داده از آن‌ها برداشت شد، به عنوان ایستگاه باران‌سنجی به مدل وارد شد. شکل ۲، موقعیت نقاط برداشت شده اطراف حوزه آبخیز کلم از ماهواره TRMM و پایگاه بارشی GPCP را نشان می‌دهد.

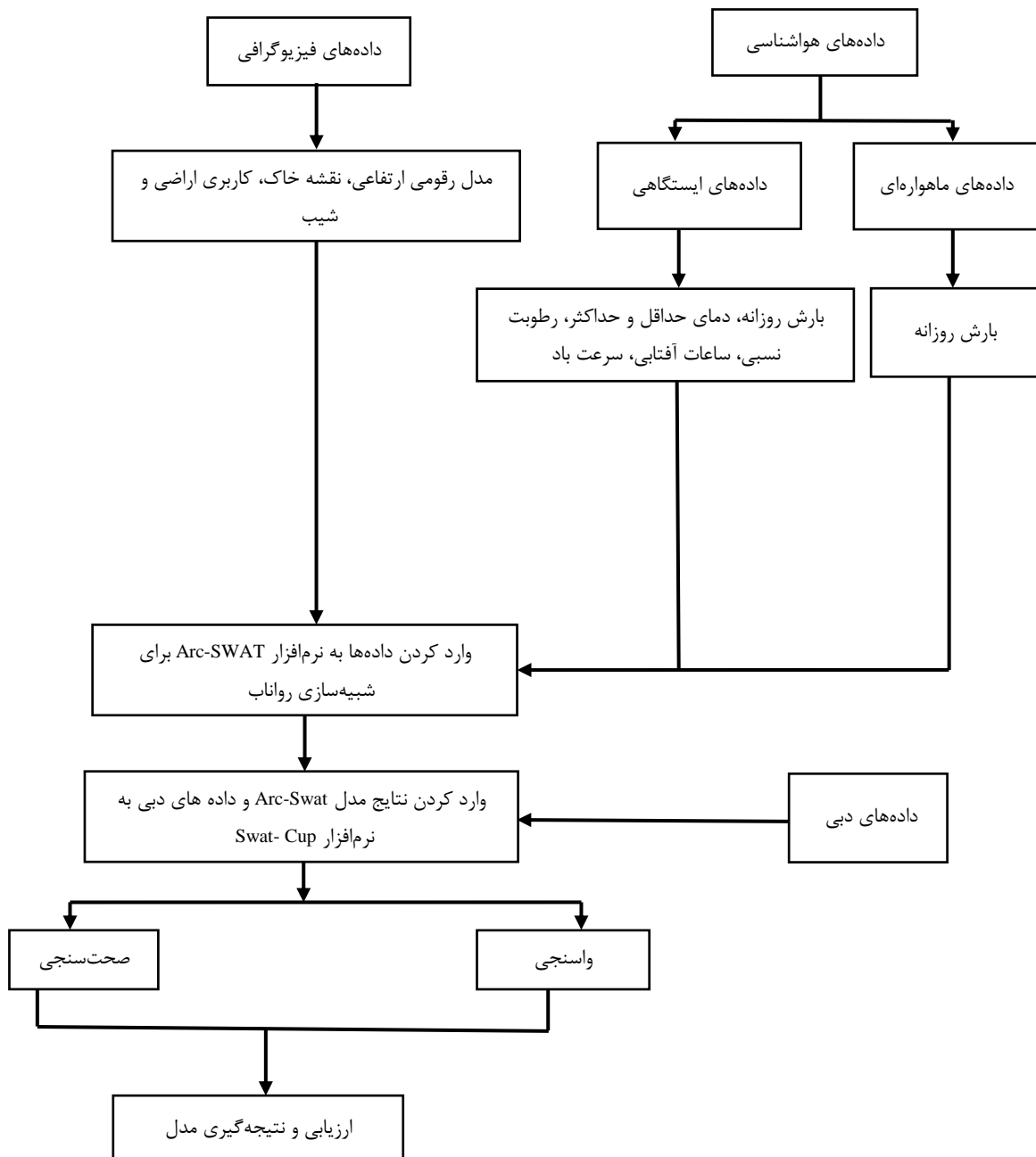
۳- نقشه‌های کاربری اراضی و نقشه خاک: این نقشه‌ها از اداره کل منابع طبیعی استان هرمزگان از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شده، نقشه مدل رقومی به کار برده شده با دقت ۱۰ متر از تارنمای USGS و ماهواره ASTER استخراج شد.

<sup>1</sup> Tropical Rainfall Measuring Mission

<sup>2</sup> Global Precipitation Climatology Project



شکل ۲- موقعیت نقاط برداشت شده اطراف حوزه آبخیز کلم به وسیله ماهواره TRMM و پایگاه بارشی GPCP جهانی



شکل ۳- مدل مفهومی انجام پژوهش

برای واسنجی مدل محدود و روشی وقت‌گیر و پرهزینه است. مدل‌سازی معکوس به‌عنوان جایگزینی مناسب برای واسنجی و تحلیل عدم قطعیت استفاده می‌شود. الگوریتم SUFI2 در واقع معکوس مدل SWAT عمل می‌کند. به این معنی که با گرفتن داده‌های مشاهده‌ای و همچنین، محدوده مجاز پارامترهای مدل که در واسنجی نمودن مدل نسبت به حوزه آبخیز مطالعاتی نقش دارند، مانند شماره منحنی خاک، میزان دمای ذوب برف و بسیاری پارامترهای دیگر، میزان بهینه پارامترهای مذکور را برآورد می‌کند. داده‌های مشاهده‌ای به‌کار رفته برای واسنجی و صحت‌سنجی داده‌های میانگین دبی ماهانه ایستگاه سلولیم در خروجی حوزه آبخیز کلم می‌باشد. صحت‌سنجی به معنی آن است که آیا روش انتخاب شده برای سنجش موضوع مورد نظر مناسب است و آن را می‌سنجد یا نه و یا به‌عبارتی دیگر ابزار اندازه‌گیری تا چه حد خصیصه مورد نظر را می‌سنجد (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷). با استفاده از نتایج تحلیل حساسیت مدل، عوامل مهم و مؤثر شناسایی شده، در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت. سپس صحت‌سنجی مدل با استفاده از مقادیر عوامل اصلاح شده در مرحله واسنجی و بر اساس آمار سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ صورت گرفت.

**تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT:** مدل‌های هیدرولوژی به پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارند که با قطعیت کامل معلوم نیستند. به‌خاطر این عدم قطعیت، مدل‌ها قادر به توصیف دقیق فرایندهای هیدرولوژیک و شیمیایی تحت شرایط طبیعی نیستند. اگر رفتار هیدرولوژیک به‌صورت واقع‌گرایانه توصیف شود، تغییرات این پارامترها همراه با تغییرات انواع خاک و کاربری اراضی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در برنامه SUFI2 یک دامنه عدم قطعیت برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود که در هنگام واسنجی سعی می‌شود، پارامترها در این محدوده قرار گیرند. برای بررسی عدم قطعیت در مدل از دو عامل P-factor و R-factor استفاده می‌شود. R-factor برابر است با ضخامت محدوده ۹۵ درصد عدم قطعیت تقسیم بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده، که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب‌تر است. P-factor نشان‌دهنده این است که چه مقدار از

این داده‌ها شامل آمار بارندگی روزانه استخراج شده از ماهواره TRMM و پایگاه بارشی GPCP، دمای کمینه و بیشینه و رطوبت نسبی ایستگاه زمینی بود. علاوه بر این باید آمار طولانی مدت کمینه یک ایستگاه مرجع هواشناسی در اختیار باشد تا برخی آمارهای مورد نیاز مدل از آن استخراج شود. در این پروژه از آمار روزانه ایستگاه سینوپتیک بندرعباس استفاده شد. تا از طریق آن داده‌های سرعت باد و تشعشع خورشیدی به‌وسیله مدل شبیه‌سازی و خطاهای احتمالی نیز برطرف شوند. در مرحله بعد داده‌های خاک به‌صورت دستی وارد پایگاه داده مدل شد و پس از این مرحله دستور اجرای مدل داده شد و نتایج استخراج شد.

**واسنجی و صحت‌سنجی مدل:** نرم‌افزار پیشرفته SWAT-CUP به‌منظور واسنجی<sup>۱</sup>، صحت‌سنجی<sup>۲</sup> و تحلیل عدم قطعیت<sup>۳</sup> مدل SWAT طراحی شده، دارای قابلیت‌ها و الگوریتم‌های متفاوت برای این کار می‌باشد. از بین پنج الگوریتم ParaSol، MCMC، GLUE، SUFI2 و PSO که برای واسنجی در نرم‌افزار SWAT-CUP در نظر گرفته شده است، از الگوریتم SUFI2 برای تحلیل عدم قطعیت، صحت‌سنجی و واسنجی استفاده شد. الگوریتم SUFI2 در سال‌های اخیر به‌عنوان یک روش مناسب در بسیاری از شاخه‌های علوم زمین و محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته است. به این خاطر که اندازه‌گیری مستقیم پارامترها زمان‌بر، پرهزینه و اغلب با محدودیت‌های زیادی مواجه است و اندازه‌گیری بعضی از پارامترهای خروجی نسبت به اندازه‌گیری بعضی از پارامترهای ورودی آسان‌تر است، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷).

واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و اتوکالیبراسیون صورت می‌گیرد که در این روش از روش اتوکالیبراسیون و الگوریتم SUFI2 بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹ انجام شد. در سال‌های اخیر مدل‌سازی معکوس، روشی معمول برای واسنجی مدل‌ها شده است. از آنجایی که انتخاب مقادیر مختلف

<sup>1</sup> Calibration

<sup>2</sup> Validation

<sup>3</sup> Uncertainty analysis

**ماهانه:** بعد از اتمام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، دبی شبیه‌سازی شده بر اساس بهینه‌سازی کردن پارامترهای ورودی به‌دست می‌آید که بیشترین شباهت را با دبی مشاهده‌ای دارد. برای نمایش و مقایسه دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده از هیدروگراف و ضریب همبستگی استفاده شد.

### نتایج و بحث

بعد از آماده‌سازی داده‌ها و اجرای مدل در اولین مرحله، مرز حوزه آبخیز، زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها به‌وسیله مدل ترسیم شد که در نتیجه ۱۶ زیرحوضه برای حوزه آبخیز تشکیل شد (شکل ۴- الف). سپس، نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز بر اساس کاربری‌های موجود در خود مدل SWAT، بر اساس کاربری‌های حوزه آبخیز تعریف شد که شامل مرتع (۳۱/۰۴ درصد)، باغ (۳/۲۵ درصد)، آب (۳/۳۹ درصد)، زمین غیر قابل کشت (۳۲/۷۵ درصد) و بوته‌زار (۲۹/۵۷ درصد) بود، به‌دست آمد (شکل ۴- ب). در مرحله بعد برای ساخت نقشه شیب حوزه آبخیز از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا در پنج طبقه صفر تا پنج، پنج تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و بیشتر از ۴۰ درصد استفاده شد و شیب بیشتر از ۴۰ درصد حدود ۶۰/۴۳ درصد از حوزه آبخیز را تشکیل می‌دهد (شکل ۴- ج). در آخرین مرحله از تلفیق سه نقشه کاربری اراضی، خاک و شیب حوزه آبخیز، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی با مجموع ۱۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی به‌وسیله مدل SWAT برای حوزه آبخیز کلم به‌دست آمد.

بر اساس نمودارهای به‌دست آمده بیشترین انطباق و همبستگی بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مربوط به ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM است که نشان از دقت بالای داده‌های ایستگاه هواشناسی و قدرت تفکیک مکانی بهتر ماهواره TRMM نسبت به پایگاه بارشی GPCP است. شکل‌های ۵ و ۶ هیدروگراف دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای و شکل‌های ۷، ۸ و ۹ ضریب همبستگی دبی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را در دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند.

داده‌های مشاهداتی در محدوده عدم قطعیت قرار گرفته‌اند و نزدیک بودن این عدد به یک نشان‌دهنده، نتیجه بهتری می‌باشد (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷).

**ارزیابی کارایی مدل SWAT:** ارزیابی نتایج واسنجی به‌وسیله معیارهای ضریب تعیین<sup>۱</sup>، R-factor، P-factor و نش-ساتکلیف<sup>۲</sup> نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی<sup>۳</sup> و ضریب تعیین وزنی صورت می‌گیرد. ضریب تعیین نسبت، پراکندگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. چنانچه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند، مقدار آن برابر با یک است. ضریب نش-ساتکلیف، ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین یک تا منفی بی‌نهایت متغیر می‌باشد (Abbaspour و همکاران، ۲۰۰۷). بهترین مقدار آن یک است و در صورتی که میزان آن بیشتر از ۰/۷۵ باشد، نشان‌دهنده این است که شبیه‌سازی به‌وسیله مدل کامل و عالی صورت گرفته است و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، شبیه‌سازی رضایت‌بخش و خوب و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد، شبیه‌سازی غیرقابل قبول است (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰). توابع هدف ضریب تعیین ( $R^2$ ) و نش-ساتکلیف (NS) ارزیابی مدل را با معادله‌های زیر انجام می‌دهند.

$$R^2 = \frac{[\sum_i(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_i(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_i(Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_i(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_i(Q_{obs} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (2)$$

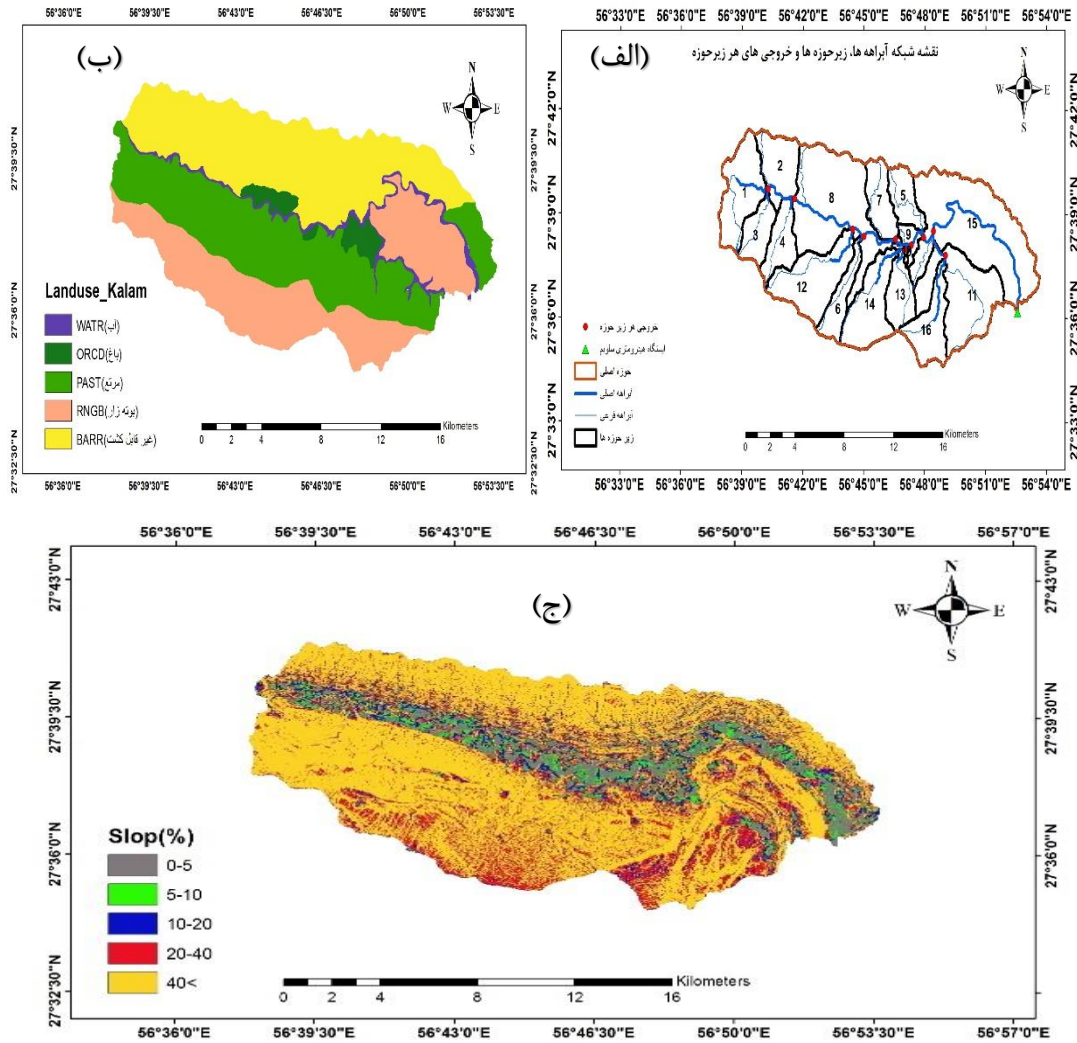
که در آن‌ها،  $Q_{obs}$  دبی جریان اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)،  $Q_{sim}$  دبی جریان پیش‌بینی شده (مترمکعب بر ثانیه)،  $\bar{Q}_{obs}$  میانگین دبی جریان اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر ثانیه)،  $\bar{Q}_{sim}$  میانگین دبی جریان پیش‌بینی شده (مترمکعب بر ثانیه) و  $i$  تعداد داده‌ها می‌باشند (Nash و Sutcliffe، ۱۹۷۰).

**هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی با پایه زمانی**

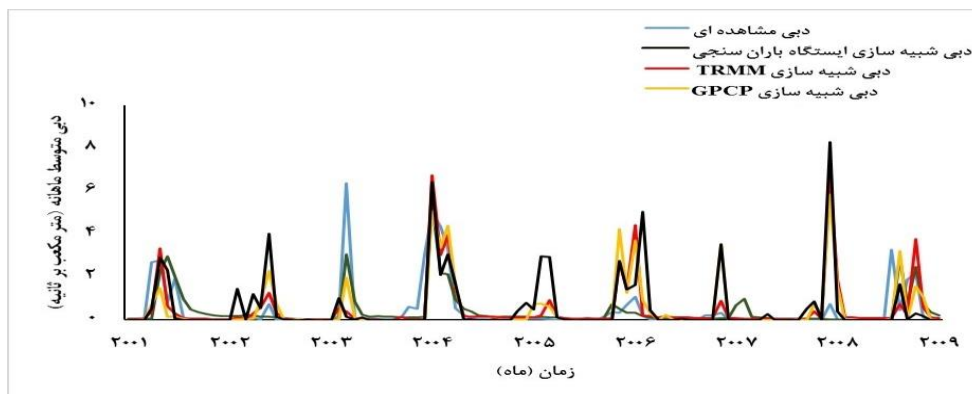
<sup>1</sup> Coefficient of Determination

<sup>2</sup> Nash-Sutcliffe

<sup>3</sup> The ratio of the mean squared error to the standard deviation of observational data



شکل ۴- نقشه، الف) آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها، ب) کاربری اراضی و ج) شیب



شکل ۵- هیدروگراف دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی

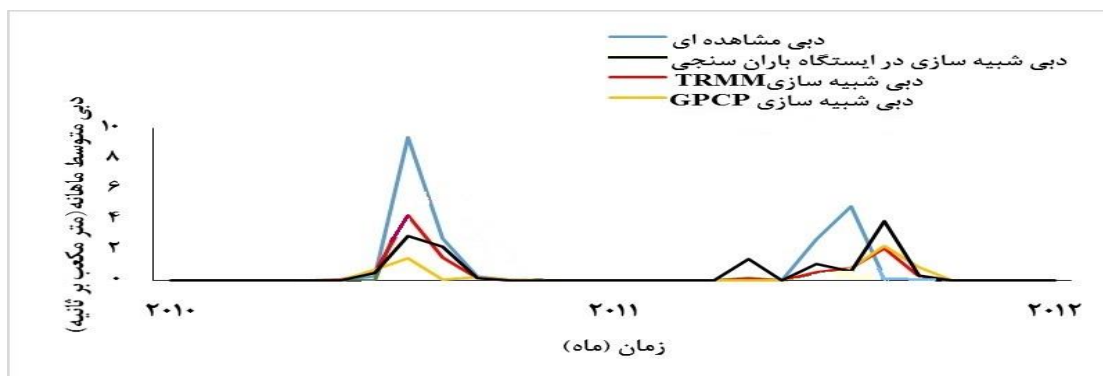
۰/۴۲ و ۰/۷۰ می‌باشد. نتایج حاکی از برآزش مناسب و خوب دبی شبیه‌سازی شده ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM با دبی مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری در دوره واسنجی است.

بر اساس نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۷ و ۸ برای ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM، همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی ۰/۵۱ و ۰/۴۴ و برای دوره صحت‌سنجی

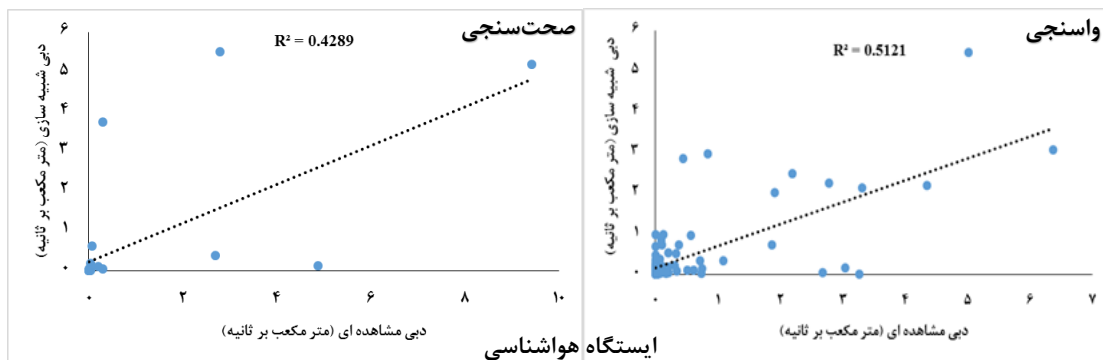


فرایند ارزیابی کارایی مدل نه تنها در جریان توسعه مدل و فرایند واسنجی، بلکه در زمان ارائه نتایج به سایر محققین نیز از اهمیت اساسی برخوردار است. ارزیابی نتایج مدل بدین منظور که آیا مدل SWAT، واسنجی و صحت‌سنجی را به درستی انجام داده یا نه، به وسیله معیارهای ضریب تعیین، R-factor، نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی، P-factor، ضریب تعیین وزنی و نش-ساتکلیف صورت گرفت.

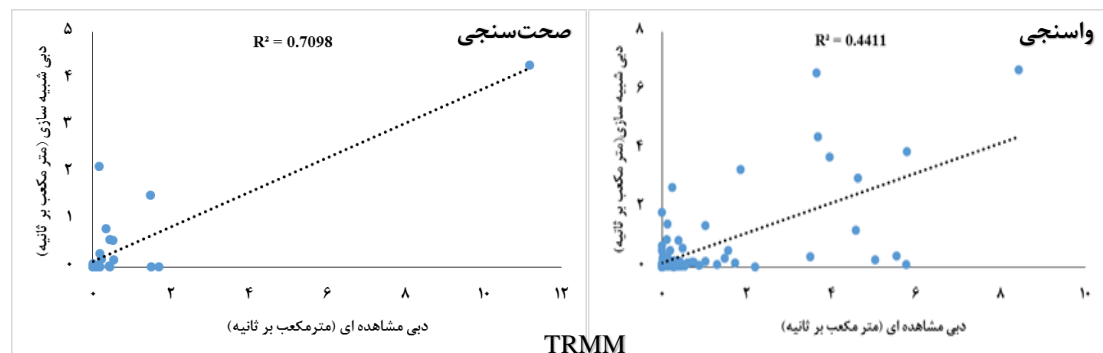
نتایج همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای پایگاه بارشی GPCP در شکل ۹ در دوره واسنجی ۰/۳۶ و در دوره صحت‌سنجی ۰/۱۸ برآورد شده است که برخلاف ماهواره TRMM و ایستگاه هواشناسی بیشترین همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی می‌باشد. به‌طور کلی ماهواره TRMM و ایستگاه هواشناسی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی دارای همبستگی بیشتری بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده نسبت به پایگاه بارشی GPCP است.



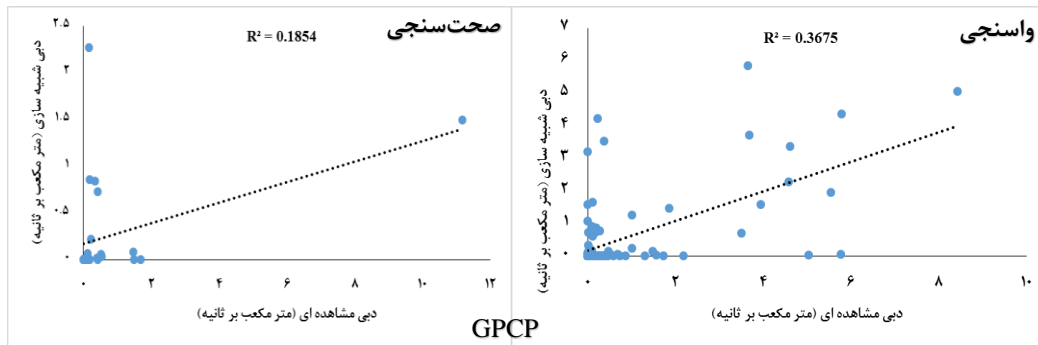
شکل ۶- هیدروگراف دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دوره صحت‌سنجی



شکل ۷- همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ایستگاه هواشناسی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی



شکل ۸- همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای ماهواره TRMM در دوره واسنجی و صحت‌سنجی



شکل ۹- همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای پایگاه بارشی GPCP در دوره واسنجی و صحت‌سنجی

که حالت بهینه آن، حالتی است که در آن محدوده عدم قطعیت، کمترین ضخامت را داشته باشد. از بین این توابع مهمترین آن‌ها ضریب نش-ساتکلیف است و بر اساس خروجی هر سه نوع بارش به کار برده شده در مدل، ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM بهترین خروجی را داشته، شبیه‌سازی قابل قبولی به وسیله داده‌های آن‌ها صورت گرفته است. مانند تحقیق Gebremichael و Bitew (۲۰۱۱) که مقدار ضریب نش-ساتکلیف به دست آمده در پژوهش آن‌ها ۰/۴ به دست آمد و با تحقیق حاضر که ۰/۵۱ و ۰/۴۱ است، برابری می‌کند. جدول ۱ مقادیر آماری پارامترهای ارزیابی نتایج مدل در مرحله واسنجی را نشان می‌دهد.

P-factor نشان‌دهنده درصد حضور داده‌های مشاهده‌ای در محدوده عدم قطعیت ۹۵ درصد است که اغلب PPU ۹۵ نامیده می‌شود. محدوده عامل P بین صفر تا یک بوده، هر چقدر عدد به دست آمده برای این عامل به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده تطابق بهتر داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی یا اندازه‌گیری شده است. مقدار این عامل برای ایستگاه هواشناسی ۰/۴۵، TRMM ۰/۴۳ و برای GPCP ۰/۳۱ به دست آمد. نتایج بیانگر این است که برای ایستگاه هواشناسی ۴۵ درصد، TRMM ۴۳ درصد و برای GPCP ۳۱ درصد داده‌های مشاهده‌ای در محدوده عدم قطعیت قرار دارند. عامل R نشان‌دهنده ضخامت پهنای محدوده عدم قطعیت بوده

جدول ۱- نتایج آماری به دست آمده در مرحله واسنجی

صحت‌سنجی			واسنجی			مشخصه	معیار ارزیابی
GPCP	TRMM	ایستگاه هواشناسی	GPCP	TRMM	ایستگاه هواشناسی		
۰/۱۰	۰/۵۲	۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۴۱	۰/۵۱	NS	نش-ساتکلیف
۰/۱۹	۰/۷۱	۰/۴۳	۰/۳۷	۰/۴۴	۰/۵۱	R <sup>2</sup>	ضریب تعیین
۰/۰۷	۰/۲۶	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۲۲	۰/۲۷	bR <sup>2</sup>	ضریب تعیین وزنی
۰/۶۵	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۰	RSR	نسبت میانگین مجذورات خطا به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی
۰/۱۵	۰/۳۷	۰/۲۲	۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۴۵	P-Factor	P-Factor
۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۴۲	۰/۶۵	R-Factor	R-Factor

است که در آن محدوده عدم قطعیت، کمترین ضخامت یا مقدار را داشته باشد. مقدار RSR در دوره واسنجی برای ایستگاه هواشناسی ماهواره TRMM و پایگاه بارشی GPCP اندکی بیش از مقدار توصیه شده ۰/۷ (Moriasi و همکاران، ۲۰۰۷) به دست آمده است، اما در دوره صحت‌سنجی برای TRMM و GPCP کمتر از مقدار توصیه شده است.

مقدار P-factor برای ایستگاه هواشناسی ۰/۴۵، TRMM ۰/۴۳ و برای GPCP ۰/۳۱ به دست آمد و نتایج بیانگر این است که برای ایستگاه هواشناسی ۴۵ درصد، ماهواره TRMM ۴۳ درصد و برای GPCP ۳۱ درصد داده‌های مشاهده‌ای در محدوده عدم قطعیت قرار دارند. عامل R که نشان‌دهنده ضخامت پهنای محدوده عدم قطعیت بوده که حالت بهینه آن، حالتی

حوضه کلم دارای شیب بیشتر از ۴۰ درصد است و این عامل باعث کاهش نفوذپذیری خاک حوضه شده و در نتیجه رواناب نیز افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود، پارامتر شماره منحنی به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر معرفی شود. در همین حال برای ماهواره TRMM زمان تأخیر جریان زیرزمینی (v\_GW\_DELAY.gw) دارای بیشترین حساسیت بوده، با میزان رواناب خروجی از حوزه آبخیز همبستگی مستقیم دارد. نتایج تحلیل عدم قطعیت با استفاده از عامل P-factor نشان داده که برای خروجی داده برای ایستگاه هواشناسی ۴۵ درصد، ماهواره TRMM ۴۳ درصد و برای پایگاه بارشی GPCP ۳۱ درصد داده‌های مشاهده‌ای در محدوده عدم قطعیت قرار دارند. از لحاظ بررسی همبستگی بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، نتایج نشان داد که دبی شبیه‌سازی شده با داده‌های ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM در هر دو دوره واسنجی و صحت-سنجی دارای بیشترین همبستگی می‌باشد. برای ارزیابی مدل از ضریب نش-ساتکلیف و ضریب تعیین استفاده شد. مقدار این ضرایب در دوره واسنجی برای ایستگاه هواشناسی، TRMM و GPCP به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۴۱، ۰/۳۲، ۰/۵۱، ۰/۴۴ و ۰/۳۷ در دوره صحت‌سنجی برابر ۰/۴۱، ۰/۵۲، ۰/۱۰، ۰/۴۳، ۰/۷۱ و ۰/۱۹ برآورد شد و نتایج نشان‌دهنده این است که مدل داده‌های ورودی مربوط به ایستگاه هواشناسی و ماهواره TRMM را قابل قبول شبیه‌سازی کرده است. اما برای داده‌های مربوط به GPCP شبیه‌سازی غیر قابل قبول می‌باشد. از این رو فرضیه موجود در این پژوهش، در زمینه قابلیت مدل برای شبیه‌سازی جریان ماهانه با داده‌های ماهواره TRMM در این منطقه تأیید می‌شود. مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در سطح جهان (Kenneth و Marvin، ۲۰۱۴؛ Bitew و Gebremichael، ۲۰۱۱) نشان می‌دهد دقت شبیه‌سازی قابل قبول و تقریباً مشابه با نتایج سایر محققین به‌خصوص تحقیق Bitew و Gebremichael (۲۰۱۱) که مقدار ضریب نش-ساتکلیف به‌دست آمده در پژوهش آن‌ها ۰/۴ و با تحقیق حاضر که ۰/۵۱ و ۰/۴۱ است برابری می‌کند.

پس از انجام مرحله واسنجی، بر اساس بهترین شبیه‌سازی انجام شده با توجه به ضرایب و عوامل ارزیابی، مقادیر بهینه پارامترها (بهترین بازه برای هر پارامتر) به‌دست آمد. ۷ بدان معنی است که مقدار ویژگی با مقدار جدید جایگزین شود و ۲ مقدار پارامتر در +۱ مقدار جدید ضرب شود، پارامتر عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی و شماره منحنی بهترین مقادیر بهینه و پارامتر میانگین شیب کانال (آبراهه) اصلی و ضریب انتقال از سفره کم عمق به عمیق ضعیف‌ترین مقدار بهینه را دارند. سایر نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پارامترهای جریان در مدل SWAT2012 در حوزه آبخیز کلم، با استفاده از بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP، واسنجی و صحت‌سنجی شد. بدین منظور از الگوریتم SUFI2 استفاده شد. در تحقیق حاضر سعی شد، به کمک آزمون و خطا بیشینه تعداد زیرحوزه آبخیز با توجه به توانایی سامانه رایانه در پردازش اطلاعات بعدی انتخاب شود. در نهایت منجر به انتخاب ۱۶ زیرحوزه آبخیز شد. در گام بعدی نقشه شیب طبقه‌بندی شد و به‌منظور تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیک با نقشه خصوصیات خاک و کاربری اراضی تلفیق شد. برای طبقه‌بندی شیب از طبقه‌بندی سازمان حفاظت خاک آمریکا استفاده و در پنج طبقه صفر تا پنج، پنج تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰ و بیشتر از ۴۰ درصد تعریف شد. حاصل تلفیق لایه‌های رقمی، ۱۶ واحد پاسخ هیدرولوژیک بود. بعد از وارد کردن داده‌های هواشناسی مدل اجرا شد و از خروجی آن در نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی استفاده شد. تحلیل حساسیت پارامترها با روش حساسیت‌سنجی نسبی انجام شد. حساسیت نسبی حاصل از آخرین شبیه‌سازی خودکار به کمک SUFI2 در دامنه پارامترهای تعیین شده نشان داد که در تحلیل حساسیت برای ایستگاه هواشناسی و پایگاه بارشی GPCP، شماره منحنی (r\_CN2.mgt) دارای بیشترین حساسیت است. پارامتر شماره منحنی مقدار رواناب را به‌دست می‌آورد و خود این پارامتر تحت تأثیر نفوذپذیری خاک حوضه می‌باشد. قسمت اعظم

جدول ۲- مقادیر بهینه عوامل حساس بعد از واسنجی برای حوزه آبخیز کلم در ایستگاه هواشناسی، ماهواره TRMM و پایگاه بارشی GPCP

رتبه حساسیت	علائم اختصاری پارامتر	ایستگاه هواشناسی						TRMM	
		کمینه	بیشینه	مقدار بهینه	کمینه	بیشینه	مقدار بهینه	کمینه	بیشینه
۱	R_CN2.mgt (شماره منحنی)	۰/۳۹	-۰/۱۷	-۰/۰۰۴	-۰/۰۰۷	۰/۳۹	۰/۳۸	-۰/۰۳	۰/۳۱
۲	V_ALPHA_BF.gw (عامل ضریب جریان پایه)	-۰/۲۶	-۰/۳۰۸	-۰/۲	-۰/۳	۰/۵۴	-۰/۱	-۰/۱۲	۰/۶۲
۳	V_GW_DELAY.gw (زمان تأخیر جریان زیرزمینی)	۲۵۰/۳	۳۹/۷	۲۰۹	۱۹۸	۵۴۱	۳۲۶	۷۶/۸	۳۲۷
۴	V_GWQMN.gw (عمق آستانه شروع جریان زیرزمینی)	۲/۲۷	-۰/۷۲۲	۱/۱۳۷	-۰/۱	۱/۲۹	۰/۶۸	-۰/۵۶	۱/۷
۵	V_SFTMP.bsn (درجه حرارت مناسب برای بارش برف)	-۰/۶۳	-۳/۵۱	-۱/۰۳	-۱/۸	۴/۴۸	۰/۹۸	-۳/۲۸	۲/۲
۶	V_ESCO.hru (ضریب تبخیر خاک)	۱/۰۳	۰/۹۶۰	۰/۹۶	۰/۷۸	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۷	۱/۰۱
۷	V_ALPHA_BNK.rte (ثابت تخلیه جریان از آبراهه اصلی)	۰/۱۶	-۰/۰۲۵	۰/۱۱۳	۰/۲۹	۰/۸۸	۰/۵۲	۰/۰۸۱	۰/۶۹
۸	V_CH_K2.rte (هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه اصلی)	۱۰۲/۸	۴۷/۷	۱۰۲	-۳۷/۳	۷۴/۸	-۱۳	۱۸/۵۷	۸۱
۹	V_REVAPMN.gw (انتقال از سفره کم عمق به عمیق)	۷/۰۳	۴/۶۳	۶/۷۳	۳/۳۱	۱۰	۹/۴	۴/۵۱	۱۳/۶
۱۰	R_OV_N.hru (ضریب مانینگ برای جریان سطحی)	-۰/۰۶	-۰/۱۶	-۰/۱	-۰/۱۴	-۰/۰۱	-۰/۰۶	-۰/۱۳	-۰/۰۰۴
۱۱	V_CH_N2.rte (ضریب مانینگ آبراهه اصلی)	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۱۲	۰/۳۸	۰/۲۰	-۰/۰۱	۰/۱۹
۱۲	V_GW_REVAP.gw (ضریب تبخیر آب زیرزمینی)	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱	۰/۰۰۸	۰/۱۳	۰/۰۹	۰/۰۷۲	۰/۲۱
۱۳	V_RCHRG_DP.gw (انتقال از سفره کم عمق به عمیق)	۰/۴۶	۰/۰۸	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۷۰	۰/۴۴	۰/۲۷	۰/۸۲
۱۴	V_SURLAG.bsn (زمان تأخیر رواناب سطحی)	۲۹/۲۶	۱۸/۰۲	۲۰/۸	۸/۲۳	۲۴/۹	۱۲	-۳/۷۳	۱۴/۸
۱۵	R_SLSUBBSN.hru (طول شیب متوسط در هر HRU)	۰/۱۷	۰/۱۳۵	۰/۱۳	۰/۰۹۶	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۰۱۰	۰/۱
۱۶	R_SOL_ZMX.sol (عمق خاک کلیه افق‌های موجود)	۱۲۳۰	-۳۹	۸/۵۳	۱۳۳	۵۴۰	۳۹۷	۱۶۸/۱	۵۱۰۰
۱۷	V_SMTMP.bsn (درجه حرارت ذوب برف)	-۰/۶۱	-۷/۸۲	-۱/۸	-۲۵/۱	۵/۱۴	۱/۲	-۲/۷	۳۲/۳
۱۸	R_PLAPS.sub (تغییرات بارش در هر ارتفاع)	۱۰۶۹	۶۱۷/۲	۸۶۰	-۱۱۹۶	۲۷۶	-۲۹۷	-۳۹۶	۸۳۶
۱۹	R_TLAPS.sub (تغییرات دما در هر ارتفاع)	۰/۰۶	-۵/۳۷	-۲/۸	-۱/۵	۱۵/۵	۸/۵	-۴/۱۶	۷/۷۶
۲۰	V_CH_S2.rte (میانگین شیب آبراهه اصلی)	۷/۰۱	۲/۶	۵/۷	۳/۷۱	۱۱/۲	۳/۷	-۴/۸	۵/۰۸

## منابع مورد استفاده

1. 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 prealpine/alpine Thur Watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4): 413-430.
2. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment, part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, 34(1): 73-89.
3. Barani Zadeh, A.M.B., B. Behyar, V. Javanmard and I. Abedini. 2011. Validation of precipitation estimations of PERSIANN satellite algorithm by ground gridded data (APHRODITE) over Iran. *The Annual Physics Conference of Iran, Urmia University, Urmia*, 2615-2618 (in Persian).
4. Beven, K. and A. Binley. 1992. The future of distributed models-model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3): 279-298.
5. Bitew, M.M. and M. Gebremichael. 2011. Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopian highlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 1147-1155.
6. Feyereisen, G., W. Strickland, T.C. Bosch and D.D. Sullivan. 2007. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the little river watershed. *Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3): 843-855.
7. Katirae Boroujerdy, P.S. 2013. Comparison of high-resolution gridded monthly satellite and ground-based precipitation data over Iran. 7(4): 149-160 (in Persian).
8. Kenneth, J. and E.B. Marvin. 2014. Impact of model complexity and precipitation data products on modeled streamflow. *Journal of Hydroinformatics*, 16(3): 588-599.
9. Li, X., Q. Zhang and Ch. Xu. 2013. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang Catchment, Poyang lake basin. *Journal of Hydrology*, 426: 28-38.
10. Moazami, S., S. Golian, M.R. Kavianpour and Y. Hong. 2013. Comparison of PERSIANN and V7 TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 34: 8156-8171.
11. Najafi, M. 2010. Hydrologic systems (precipitation-runoff simulations). Tehran University Press, (in Persian).
12. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
13. Sadeghi, S.H.R. and Gh. Nourmohammadi. 2006. Development and analysis of monthly precipitation-runoff models in Haraz Basin, Mazandaran Providence. *Journal of Caspian Agricultural and Natural Resource Sciences*. 3(1): 1-12 (in Persian).
14. Xu, C.Y. 2003. Testing the transferability of regression equations derived from small sub-catchments to large area in central Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7: 317-324.
15. Yin, X. and A. Gruber. 2010. Validation of the abrupt change in GPCP precipitation in the Congo River Basin. *International Journal of Climatology*, 30(1): 110-119.
16. Zhu, H., Y. Li, Zh. Liu, Xi. Shi, B. Fu and Z. Xing. 2015. Using SWAT to simulate streamflow in Huifa River basin with ground and Fengyun precipitation data. *Journal of Hydroinformatics*, 17(15): 834-844.
17. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
18. Hosseini, M., M. Ghafouri, M. Tabatabaei, M. Goodarzi and M. Mokarian. 2017. Estimating hydrologic budgets for six Persian Gulf watersheds, Iran. *Applied Water Science*, 7: 3323-3332.
19. Hosseini, M. and M. Mokarian. 2016. Investigation and estimation of Gulgal Basin underground flow using SWAT model. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 8(1): 80-92 (in Persian).
20. Garizi, A., A. Talebi and M. Faramarzi. 2016. Identification and prioritization of critical areas of soil erosion and sediment using SWAT model. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 8(4): 350-361 (in Persian).