

## شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز طالقان با استفاده از مدل SWAT

مهسا آقاخانی<sup>۱</sup>

تورج نصرآبادی<sup>۲\*</sup>

[tnasrabadi@ut.ac.ir](mailto:tnasrabadi@ut.ac.ir)

علیرضا وفائی نژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۲۵

### چکیده

**زمینه و هدف:** مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز نقش مهمی در مطالعه، توسعه و مدیریت منابع آب دارد. با توجه به اهمیت حوضه آبخیز طالقان به‌عنوان تامین‌کننده بخش مهمی از منابع آب استان‌های البرز و تهران، در این پژوهش، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی آب-های سطحی در این حوضه مورد مطالعه قرار گرفته است.

**روش بررسی:** شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با به‌کارگیری مدل نیمه‌توزیعی فیزیکی SWAT (Soil and Water Assessment Tool) انجام گرفت. هم‌چنین واسنجی و آنالیز حساسیت مدل با استفاده از الگوریتم SUFI-2 صورت پذیرفت. کارایی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری نش - ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** آنالیز حساسیت نشان داد که مدل نسبت به پارامترهای شماره منحنی (CN)، ضریب تبخیرخاک و ظرفیت آب قابل دسترس خاک دارای بیش‌ترین حساسیت می‌باشد. ضرایب NS و  $R^2$  در ایستگاه گلینک (خروجی حوضه) پس از کالیبراسیون به‌ترتیب برابر ۰/۸۴ و ۰/۸۷ و در صحت‌سنجی برابر ۰/۷۹ و ۰/۸۴ برآورد گردید.

**بحث و نتیجه‌گیری:** نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی حوضه آبخیز مورد مطالعه دارد. هم‌چنین نشان داده شد که مدل قابلیت بالایی برای پیش‌بینی میزان رواناب ماهانه حوضه طالقان دارد. به‌کارگیری این مدل به‌دلیل کاهش هزینه عملیات میدانی به‌منظور اندازه‌گیری مولفه‌های مورد نیاز و به‌ویژه به‌دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسایل، جهت ارتقای سطح مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست کارآمد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌سازی هیدرولوژیکی، حوضه آبخیز، مدل SWAT، الگوریتم SUFI-2

---

۱- دکترای مدیریت محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
۲- دانشیار، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
\* (مسئول مکاتبات)  
۳- استادیار، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

## **Hydrological Simulation of Taleqan Watershed Using SWAT**

**Mahsa Aghakhani<sup>1</sup>**

**Touraj Nasrabadi<sup>2\*</sup>**

[tnasrabadi@ut.ac.ir](mailto:tnasrabadi@ut.ac.ir)

**Alireza Vafaei Nejad<sup>3</sup>**

Admission Date: August 16, 2017

Date Received: May 5, 2017

### **Abstract**

**Background and Objective:** Hydrological modeling of watersheds plays a significant role in study, development and management of water resources. Based on importance of Taleqan Watershed as a main supplier of Alborz and Tehran Provinces water resources, in this study, surface water hydrological simulations in this basin are investigated.

**Method:** Hydrological simulations were performed by applying physical semi-distributed SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. Moreover, model calibration and sensitivity analysis were done using SUFI-2 algorithm. Model performance is evaluated by means of statistical indicators such as Nash-Sutcliffe (NS) and coefficient of determination ( $R^2$ ).

**Findings:** Sensitivity analysis showed that the parameters of the curve number (CN), soil evaporation compensation, and soil available water capacity are the most important factors to control the flow in the basin. At Gelinak station (watershed outlet), NS and  $R^2$  coefficients values after calibration are 0.84 and 0.87, respectively. These values in validation interval were obtained as 0.79 and 0.84.

**Discussion and Conclusion:** The results show good performance of the watershed simulations. Moreover, it was shown that the model has good capability for monthly surface runoff prediction of the Taleqan basin. Due to reducing field operations costs of required components measurements and especially due to reducing the time required to analyze issues, applying this model is efficient for improving water resource management and environmental protection.

**Key words:** Hydrological Modeling, SUFI-2 Algorithm, SWAT Model, Watershed.

---

1- PhD., Department of Environmental Management, Faculty of the Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Environmental Planning, Management, and Education, School of Environment, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, \*(Corresponding Author).

3- Assistant Professor, Faculty of the Environment and Energy, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

## مقدمه

رواناب ایجاد شده در یک حوضه از مهم ترین موضوعات در مطالعات هیدرولوژیکی حوضه آبخیز می باشد، چرا که اکثر فرآیندهای هیدرولوژیکی به طور مستقیم و یا غیرمستقیم با آن در ارتباط هستند و به نوعی متاثر از آن می باشند. شناخت فرآیندهای هیدرولوژیکی و شبیه سازی آن ها در مقیاس حوضه آبخیز و پیش بینی تغییرات این فرآیندها در آینده همواره از چالش های پیش روی هیدرولوژیست ها می باشد.

از این رو در سال های اخیر مدل های هیدرولوژیکی به عنوان ابزاری برای شناخت فعالیت های طبیعی و انسانی موثر بر سیستم هیدرولوژی حوضه و مدیریت و برنامه ریزی آن ها، به طور گسترده توسط مدیران و هیدرولوژیست ها به کار گرفته می شوند.

مدل هایی از قبیل HSPF، EPIC، AGNPS،

CREAMS و SWRRB در زمینه آنالیز کیفیت آب و هیدرولوژی در مقیاس حوضه آبخیز توسعه یافته اند. اگرچه این مدل ها در بسیاری موارد مفید و کاربردی هستند ولی جهت مدل سازی حوضه آبخیز محدودیت هایی نیز دارند. از آن جا که حوضه های آبخیز بزرگ از طیف وسیعی از پارامترهای اکولوژیکی، توپوگرافی، تنوع بالای خاک، پوشش زمین و تغییرات اقلیم در بازه های زمانی و مکانی مختلف برخوردار هستند، که بر فرآیندهای بارش-رواناب تاثیرگذار می باشد، استفاده از مدل های هیدرولوژیکی توزیعی نسبت به مدل های فشرده توصیه شده است (۱).

در این مطالعه جهت مدل سازی حوضه آبخیز، از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) استفاده می گردد. عملکرد خوب این مدل برای ارزش یابی اثرات عملیات مدیریت زمین بر آب، رسوب و محصولات کشاورزی در حوضه های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک های متغیر، کاربری اراضی، شرایط مدیریتی متغیر در طول دوره های زمانی و شرایط توپوگرافی متفاوت اثبات شده است (۲).

در کنار کاربردهای موفقیت آمیز مدل مذکور، به دلیل دارا بودن برخی نواقص، انجام برخی پردازش های عددی مانند کالیبراسیون پارامتر و آنالیز حساسیت نیز ضروری می باشد. با

آنالیز حساسیت پارامترهای مدل، شناسایی پارامترهای حساس با توجه به اثرات شان بر خروجی های مدل امکان پذیر می باشد. شناسایی پارامترهای حساس، به کاهش عدم قطعیت و به شبیه سازی بهتر منتهی می گردد (۳).

Alansi (۲۰۰۹) با استفاده از مدل SWAT اقدام به شبیه سازی رواناب و بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی بالادست حوضه برنام در کشور مالزی نمود (۴). Fadil (۲۰۱۱) تحقیقی با هدف مدوله کردن هیدرولوژی در یک حوضه واقع در قسمت مرکزی- شمالی مراکش، Bouregreg، با استفاده از SWAT به منظور آگاهی از فرایندهای هیدرولوژیکی حوضه آبخیز انجام داد (۵). Ghoraba (۲۰۱۵) تحقیقی با هدف مدل سازی حوضه آبخیز سد Simly پاکستان با استفاده از SWAT انجام داد. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار SWAT نسبت به تخمین حجم ماهانه جریان آب ورودی به سد و تعیین بیلان آبی اقدام نمودند (۶). Akhavan (۲۰۱۰) به منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی در نیترات آب شویی شده در حوضه آبخیز همدان از مدل SWAT براساس داده های رواناب و عملکرد محصول استفاده کرد (۷).

Park (۲۰۱۷) مطالعه ای با هدف ارزیابی اثرات مدیریت چرای جایگزین بر کیفیت آب در مقیاس حوضه آبخیز و همچنین مقیاس مزرعه در حوضه Clear Creek در قسمت های شمالی و مرکزی تگزاس با استفاده از نرم افزار SWAT انجام دادند و از طریق تدوین سناریوهای مختلف تاثیر روش های مختلف چرا را بر میزان فسفر و نیتروژن کل بررسی نمودند (۸). همچنین Kundu (۲۰۱۷) مطالعه ای با هدف ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر بیلان آب بخشی از رودخانه Narmada هند انجام داد. شبیه سازی با SWAT نشان داد که تغییرات کاربری بر کاهش تبخیر و تعرق و افزایش رواناب در زیر حوضه های مختلف تاثیر گذار بوده است (۹).

در این مطالعه، از نرم افزار SWAT برای مدل سازی حوضه آبخیز طالقان واقع در شمال غرب کلان شهر کرج که یکی از مهم ترین منابع تامین آب استان تهران می باشد استفاده گردید.

بیشترین بارش در این منطقه به شکل برف می باشد. هیدرولوژی غالب بر حوضه شامل حجم بالای رواناب در فصل بهار به دلیل ذوب برف، با ماکزیمم رواناب ناشی از بارش‌های بهاری می باشد (۱۰). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه واقع در بالادست سد طالقان، در حوضه آبخیز طالقان را نشان می دهد که در  $36^{\circ}04'$  تا  $36^{\circ}21'$  عرض شمالی و  $50^{\circ}38'$  تا  $51^{\circ}12'$  درجه طول شرقی قرار دارد. کاربری عمده از نوع مرتعی می باشد. بخشی از اراضی نیز تحت پوشش کاربری کشاورزی آبی و دیم می باشد. بافت خاک حوضه نیز عمدتاً لومی و سیلت لومی می باشد. در این مطالعه ایستگاه پیمایش خروجی ایستگاه گلینک با مساحت حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع می باشد. دو ایستگاه پیمایش دیگر، به نام ایستگاه جوستان (میانه حوضه) و ایستگاه گته ده (ابتدای حوضه)، جهت مقایسه نتایج با نتایج حاصل از گلینک انتخاب گردید.

#### - روش تحقیق

در این تحقیق جهت شبیه سازی پاسخ هیدرولوژی حوضه آبخیز طالقان از مدل SWAT که قابلیت اتصال به نرم افزار ArcView دارد، استفاده گردید. در مدل SWAT ابتدا حوضه آبخیز اصلی براساس نقشه DEM به تعدادی زیر-حوضه که از طریق شبکه آبراهه ها به یکدیگر متصل شده اند، تقسیم می شود، سپس بر مبنای نقشه های خاک و کاربری اراضی زیرحوضه ها نیز به واحدهای کوچک تری تحت عنوان "HRU" تقسیم می شوند. هر HRU دارای ویژگی های خاک، توپوگرافی، پوشش و کاربری اراضی همگن می باشد. برای هر واحد هیدرولوژیک، میزان آب و رسوب و چرخه عناصر و تلفات تعیین می شود و برای هر زیرحوضه نیز متوسط وزنی محاسبه می گردد. آن گاه پس از جمع شدن این مقادیر در مسیر شبکه رودخانه تا محل خروجی حوضه با یکدیگر، مقدار نهایی برای حوضه تعیین می شود (۱۱).

این مدل ارابه سناریوهای متنوع براساس تغییرات ورودی هایی از قبیل پوشش زمین، کاربری اراضی، اقلیم بر چرخه مواد

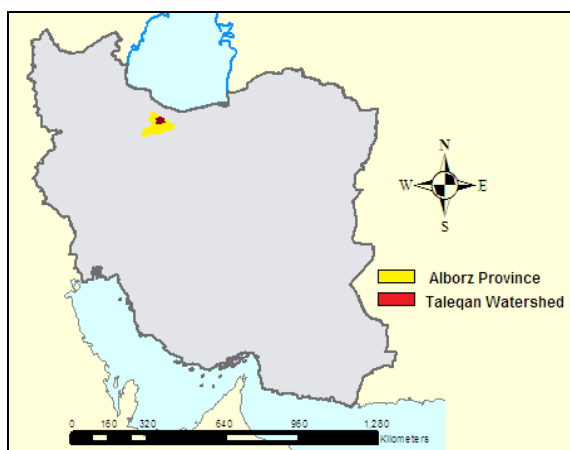
اهداف این مطالعه شبیه سازی رواناب سطحی و شناسایی پارامترهای حساس هیدرولوژیکی مرتبط با آن و همچنین کالیبراسیون و صحت سنجی مدل برای رواناب می باشد. پارامترها نیز بر اساس بزرگی حساسیت پاسخ متغیر به هر یک از پارامترهای مدل، به حساسیت های بالا و پایین رتبه بندی شد. سپس مدل SWAT براساس تغییرات مقادیر پارامترهای حساس درون مقادیر مجاز آن ها کالیبره شد. کالیبراسیون و صحت سنجی مدل به کمک نرم افزار SWAT-CUP و با استفاده از اطلاعات برداشت شده از ایستگاه های هیدرومتری موجود در حوضه انجام شده است. در این تحقیق از الگوریتم SUFI2 استفاده شده است که قادر است عدم دقت در متغیرهای سریع (مثل بارش) و عدم دقت در مدل مفهومی، عدم دقت در تخمین پارامترها و در داده های اندازه گیری شده را در نظر گیرد. سپس نتایج حاصل از شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری شده رواناب در خروجی حوضه آبخیز مقایسه گردید. شایان ذکر است که مدل سازی این حوضه با دقت و حساسیت بسیار در فراهم نمودن داده ها، نقشه ها و اطلاعات ورودی به مدل و مقداردهی پارامترهای مدل سازی با توجه به منطقه مورد مطالعه به انجام رسید که حاصل آن یک مدل قابل اعتماد جهت انجام مطالعات علمی و آزمون سناریوهای مدیریتی می باشد. بنابراین بدون هدررفت هزینه و وقت و بدون نگرانی از رخداد نتایج نامطلوب احتمالی محیط زیستی و اجتماعی می توان تصمیمات اخذ شده را پیش از اجرا، ارزیابی نمود.

#### مواد و روش ها

##### - ویژگی های منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز طالقان در دامنه جنوبی رشته کوه های البرز و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال غربی تهران واقع است. در مجموع منطقه ای کوهستانی با شیب های تند در اطراف طالقان رود قرار دارد. بیشینه و کمینه بارش متوسط سالیانه به ترتیب ۸۱۴ و ۴۵۴ میلی متر در ایستگاه های گلینک و دیزان ثبت شده است، متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰/۵ درجه سانتی گراد، و اقلیم غالب منطقه سرد و نیمه مرطوب می باشد.

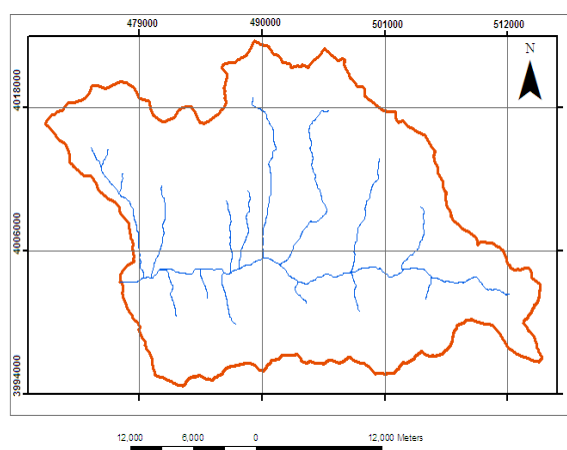
برحسب روز،  $R_{day}$  مقدار بارش در روز  $i$  (میلی متر)،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب سطحی در روز  $i$  (میلی متر)،  $E_a$  مقدار تبخیر و تعرق در روز  $i$  (میلی متر)،  $W_{seep}$  مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز  $i$  (میلی متر) و  $Q_{gw}$  مقدار آب زیرزمینی برداشت شده در روز  $i$  (میلی متر) می باشد (۱۲).



مغذی، کیفیت و کمیت آب را برای کاربران ممکن می سازد. در مدل SWAT چرخه هیدرولوژی بر اساس معادله بیلان آب شبیه سازی می شود (رابطه ۱).

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

که در آن:  $SW_t$  مقدار نهایی آب موجود در خاک (میلی متر)،  $SW_0$  مقدار اولیه آب موجود در خاک (میلی متر)،  $t$  زمان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1. The watershed geographical location

مطالعاتی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ مربوط به سازمان نقشه برداری کل کشور استفاده گردید. مدل مورد نظر، از این نقشه جهت محاسبه خصوصیات مورفومتری حوضه، زیرحوضه ها و آبراهه اصلی استفاده می کند (۱۳).

**ج - نقشه کاربری اراضی:** به منظور تهیه نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از نقشه های کاربری اراضی رقومی به روز شده توسط تصاویر ماهواره ای ETM (۲۰۱۳) مربوط به مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری استفاده گردید.

**د - نقشه خاک:** جهت تهیه نقشه رقومی خاک و اطلاعات مربوط به خاک شناسی حوضه از نقشه ها و گزارش های خاک شناسی مربوط به حوضه طالقان استفاده شد. جهت تدقیق پارامترهای خاک، مهم ترین پارامترهای خاک مؤثر بر خروجی های مدل، در مرحله واسنجی دخالت داده شدند و مقادیر بهینه آنها تعیین گردید.

**- لایه های اطلاعاتی مورد استفاده در مدل SWAT**  
داده های ورودی مورد نیاز مدل SWAT شامل نقشه مدل رقومی ارتفاع، داده های خاک، داده های بارش، دما، هواشناسی، نقشه خاک و نقشه کاربری اراضی می باشد.

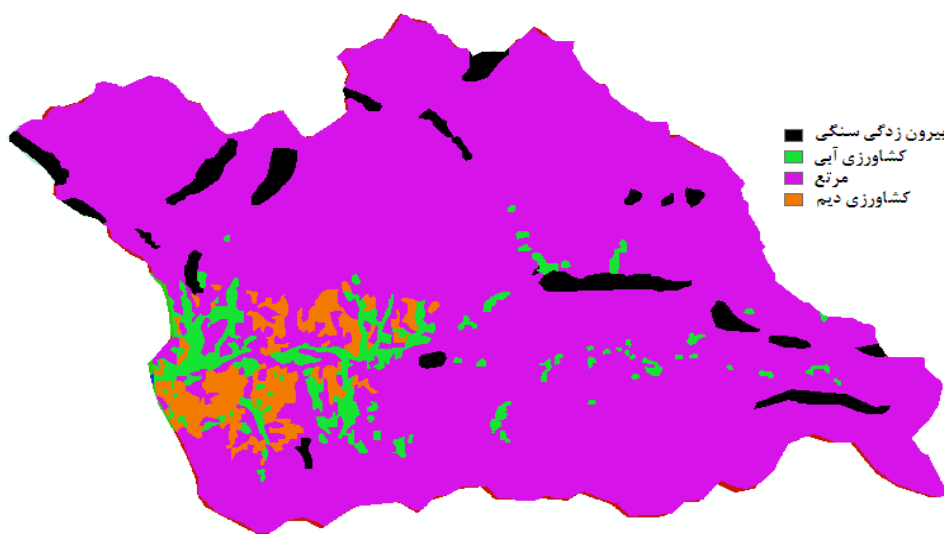
**الف - داده های هواشناسی:** در این تحقیق داده های هواشناسی به شکل جداگانه ماهانه و روزانه در طول دوره ۱۵ ساله آماری از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ به مدل معرفی گردید. داده های روزانه شامل بارش و درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه می باشند. این اطلاعات از سازمان هواشناسی و شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ گردید. مشخصات ایستگاه های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران سنجی، مطابق جدول ۱ می باشد.

**ب - نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM):** جهت تهیه این نقشه، از نقشه های توپوگرافی رقومی سال ۲۰۱۳ حوضه

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سنجش دما و بارش

Location of rainfall and temperature stations Table 1.

ارتفاع (m)	X (UTM)	Y (UTM)	نام ایستگاه
۱۹۹۰	۴۷۷۲۶۶	۴۰۰۹۶۳۹	حسنجون
۲۲۲۰	۴۹۰۹۵۶	۴۰۰۴۵۵۱	جوستان
۲۳۱۰	۴۹۰۸۳۵	۳۹۹۸۷۳۶	نسا
۲۴۰۰	۵۰۵۷۹۶	۴۰۰۴۴۹۰	دهدر



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز

Figure 2. The watershed land use map

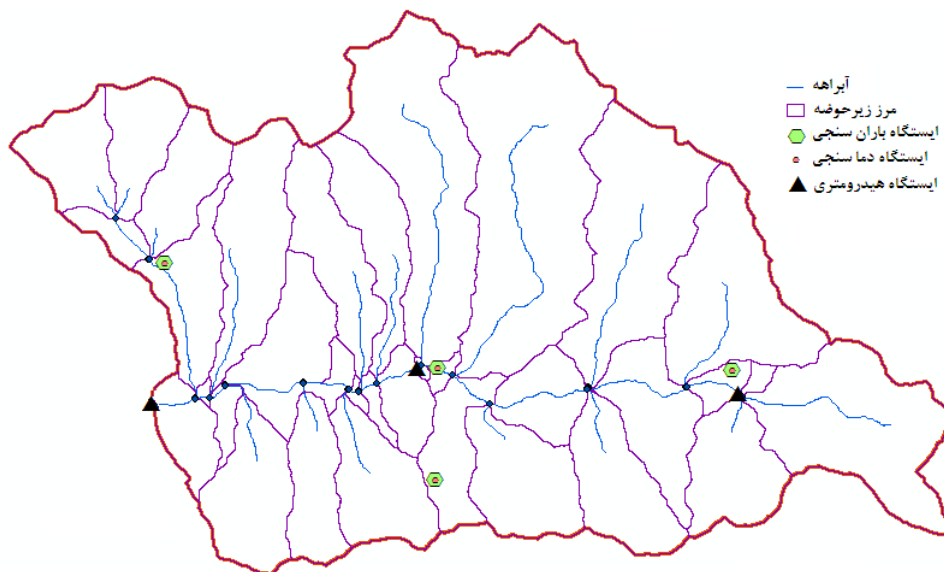
### اجرای مدل و استخراج خروجی‌های مدل

دست یابی به قطعیت بیشتر در نتایج شبیه سازی هیدرولوژیکی حوضه توسط مدل این اطلاعات تهیه و به مدل معرفی گردید.

به منظور بررسی کیفی و کمی کارایی مدل، به مقایسه بصری پلات های سری زمانی و شاخص‌های آماری هم‌چون شاخص کارایی مدل یا معیار نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) پرداخته شد. مقدار معیار نش-ساتکلیف از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است؛ و ۱ یعنی برازش عالی؛ مقدار بزرگ‌تر از ۰/۷۵ یعنی نتایج شبیه سازی خوب، و بین ۰/۳۶-۰/۷۵ یعنی رضایت بخش و پذیرفتنی بودن نتایج است. شاخص کارایی نشان‌دهنده عملکرد نسبی مدل است (۱۵).  $R^2$  بیان‌گر واریانس تعیین شده به وسیله مجموعه متغیرهاست، که ضریب تعیین نام دارد.

اولین مرحله در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه توسط SWAT، تقسیم حوضه به زیرحوضه‌ها و تقسیم هر زیرحوضه به واحدهای پاسخ هیدرولوژی (HRU) می‌باشد (۱۴). از این رو جهت اجرای مدل، لایه های اطلاعاتی به مدل معرفی و حوضه به ۳۵ زیرحوضه و هر زیرحوضه به تعدادی HRU تقسیم‌بندی شد. در شکل ۳ نقشه حوضه مورد مطالعه به‌همراه زیرحوضه‌ها، ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در مدل نشان داده شده است. با توجه به فیزیکی بودن این مدل، لازم است که پارامترها منطبق با شرایط منطقه تعریف شود. از پارامترهای به‌کار رفته در مدل که قبل از انجام عمل واسنجی با توجه به گزارش‌های موجود مقدار پیش فرض آن‌ها تغییر داده شد که عبارت از: تغییر دما با ارتفاع، دمای متوسط هوا برای بارش برف و ضریب مانینگ بستر رودخانه می باشند. جهت

هرچه مقدار آن به یک نزدیک تر باشد کیفیت شبیه سازی بالاتر است (۱۲).



شکل ۳- حوضه آبخیز طالقان، رواناب سطحی، ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری  
Figure 3. Taleqan watershed, stream flow, weather stations and hydrometric stations

## نتایج

### نتایج آنالیز حساسیت، واسنجی و صحت سنجی مدل

اهمیت نسبی پارامترهای ورودی مدل با توجه به خروجی آن، به‌طور معمول با استفاده از تحلیل حساسیت ارزیابی می‌شود. پارامترهای زیادی در مدل SWAT برای شبیه سازی بارش- رواناب نقش دارند. قبل از کالیبراسیون با توجه به داده‌های در دسترس، داشتن درک درست از مشخصات حوضه آبخیز و فرآیندهای هیدرولوژیکی مورد نظر، اهمیت دارد. بنابراین کاهش تعداد پارامترها با حذف پارامترهای کم تاثیرتر ضروری است (۷). پس از انجام آنالیز حساسیت با نرم‌افزار SWATCUP، ۱۸ پارامتر به‌عنوان پارامترهایی که مدل نسبت به آن‌ها حساسیت بیش‌تری دارند، تعیین گردید. با انجام تحلیل حساسیت، مشخص شد که پارامتر شماره منحنی (CN) مهم ترین فاکتور است؛ و پارامترهای ضریب تبخیر خاک (ESCO)<sup>۱</sup> و ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL\_AWC)<sup>۲</sup>، به ترتیب در زمره مهم ترین فاکتورهای کنترل کننده دبی جریان در حوضه طالقان اند. رتبه حساسیت

پارامترهای مهم در این تحقیق، در جدول ۲ نشان داده شده است.

### کالیبراسیون و صحت سنجی

پس از تعیین حساس ترین پارامترهای مدل، واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI-2 (۱۶) برای سال های آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ با استفاده از داده‌های دبی مشاهداتی سه ایستگاه هیدرومتری که مشخصات آن‌ها در شکل ۳ آمده است، انجام پذیرفت. این سه ایستگاه به نام‌های گته ده، جوستان و گلینک به ترتیب در ابتدا، میانه و انتهای حوضه آبریز واقع می- باشند. داده‌های رواناب روزانه از این سه ایستگاه توسط موسسه تحقیقات آب ایران جمع آوری شده است. مقدار بهینه پارامترها پس از واسنجی مدل در جدول ۲ ارائه گردیده است.

نتایج واسنجی رواناب مدل در این سه ایستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر شبیه سازی، مقادیر مشاهده‌ای را چه از لحاظ میزان رواناب و چه از لحاظ زمان وقوع اوج‌ها (پیک‌ها) به خوبی دنبال می‌نمایند. مقادیر شاخص‌های آماری شامل ضریب نش-ساتکلیف (NS) و

1 - Soil evaporation compensation factor

2 - Available water capacity of the soil layer

ضریب تعیین  $R^2$  برای این سه ایستگاه به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۸۱ و ۰/۸۷ برآورد گردیده است. مقادیر این ضرایب نشان-دهنده کیفیت مناسب شبیه سازی حوضه آبخیز مورد مطالعه دارد.

ضریب تعیین  $R^2$  قبل و بعد از کالیبراسیون در جدول ۳ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می گردد مقادیر این ضرایب پس از کالیبراسیون در مقایسه با مقادیر آن ها پیش از واسنجی بسیار متفاوت است. ضرایب NS در ایستگاه گته ده، جوستان و گلینک به ترتیب برابر ۰/۸۰، ۰/۷۸ و ۰/۸۴ و مقادیر

جدول ۲- رتبه بندی حساسیت پارامترها

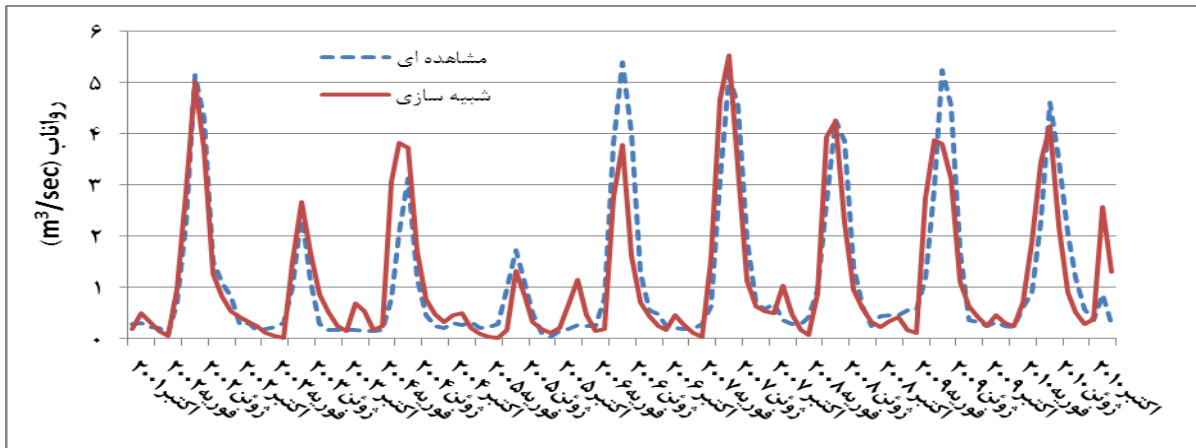
Table 2. Parameters sensitivity ranking

رتبه بر اساس حساسیت	حوزه	پارامتر	مقدار نهایی
۱	.mgt	CN2	-۰/۲۹۱
۲	.hru	ESCO	۰/۹۶۵
۳	.sol	SOL_AWC	۰/۳۷۹
۴	.gw	GW_DELAY	۵۶/۲۱۳
۵	.bsn	SNO50COV	۰/۵۷۸
۶	.gw	ALPHA_BF	۰/۱۴۲
۷	.bsn	SNOCVMX	۴۴۶/۱۱۶
۸	.bsn	SMTMP	-۶/۲۹۷
۹	.sub	SNO_SUB	۹۶/۰۴۰
۱۰	.bsn	SFTMP	۲/۹۰۲
۱۱	.rte	ALPHA_BNK	۰/۰۷۸
۱۲	.gw	GWQMN	۰/۴۵۱
۱۳	.hru	EPCO	۰/۳۸۷
۱۴	.sol	SOL_CBN	۱۳/۱۶۰
۱۵	.bsn	SURLAG	۱۶/۰۶۲
۱۶	.sol	SOL_BD	۰/۸۷۹
۱۷	.gw	GW_REVAP	۰/۳۱۷
۱۸	.sol	SOL_K	۰/۳۷۶

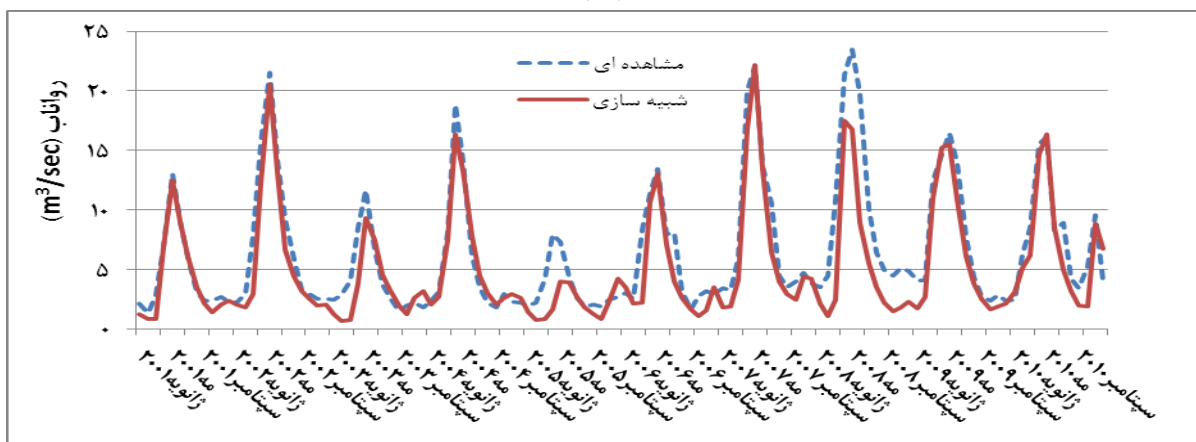
جدول ۳- شاخص های آماری نش ساتکلیف و  $R^2$  قبل و بعد از واسنجیTable 3. Nash-Sutcliffe and  $R^2$  statistical indexes before and after calibration interval

پس از واسنجی		پیش از واسنجی		نام ایستگاه
NS	$R^2$	NS	$R^2$	
۰/۸۰	۰/۸۶	۰/۱۳	۰/۲۵	گته ده
۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۲۷	۰/۴۶	جوستان
۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۴۶	۰/۵۴	گلینک

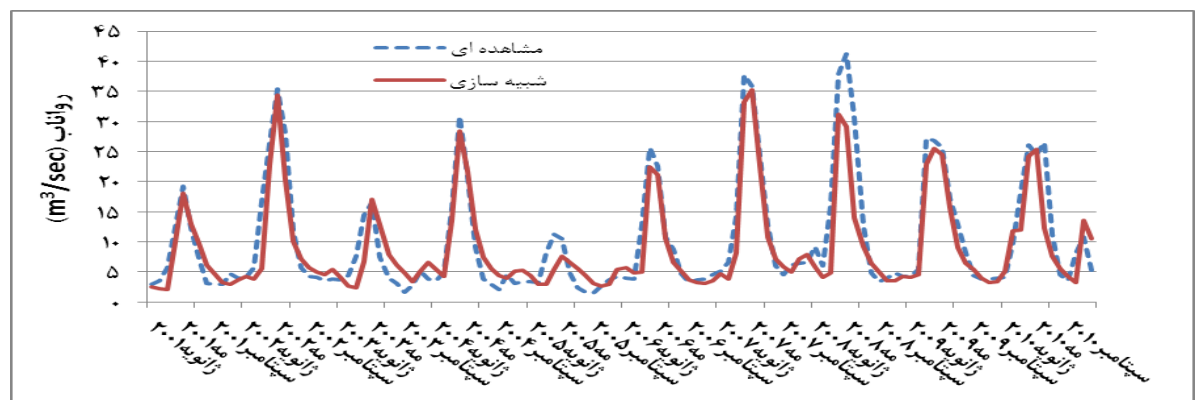




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- رواناب سطحی شبیه سازی و مشاهده شده در دوره واسنجی در الف) ایستگاه گته ده؛ ب) ایستگاه جوستان؛ ج)

#### ایستگاه گلینک

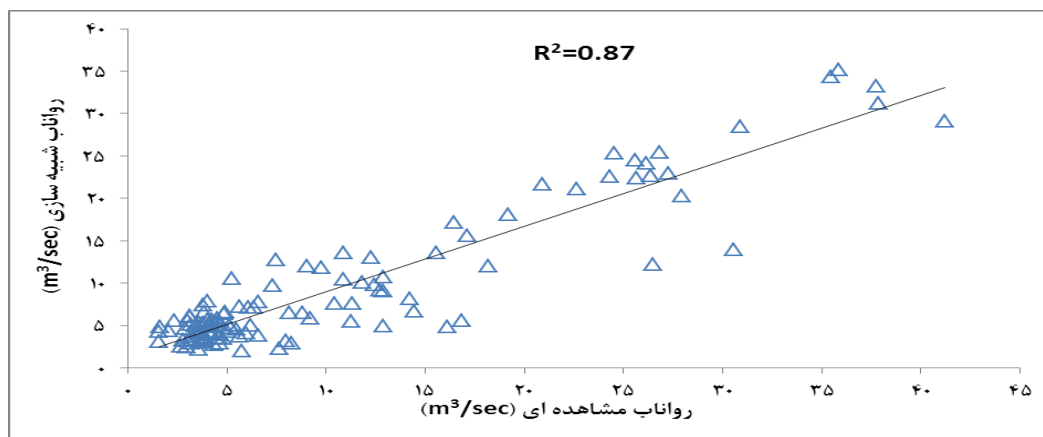
Figure 4. Monthly observed and simulated surface runoff in calibration period in (a) Gatehdeh station; (b) Joestan station; (c) Gelinak station

ملاحظه می‌گردد که مشخص کننده مدل سازی مناسب حوضه آبخیز مورد مطالعه می باشد. پس از واسنجی مدل، لازم است جهت اطمینان از کیفیت مدل- سازی به صحت سنجی مدل پرداخته گردد. صحت سنجی

در شکل ۵ نمودار مقایسه مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه سازی در ایستگاه گلینک نشان داده شده است. با توجه به این نمودار همبستگی بالایی میان مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی

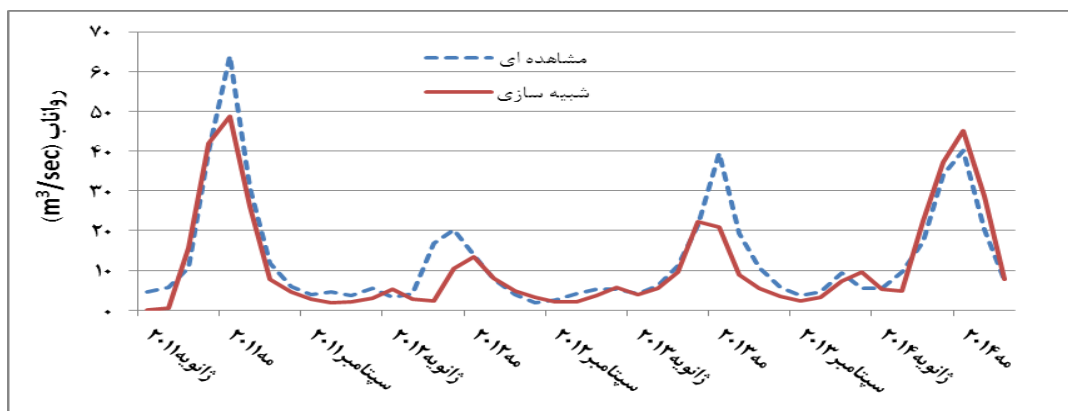
شده و در شرایط جدید تنظیم نگردیده اند، اما ضرایب NS و  $R^2$  مقادیر بسیار مناسبی را نشان می‌دهند. به عنوان مثال در ایستگاه گلینک که خروجی حوضه می‌باشد، این ضرایب به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۸۴ می‌باشد که نشان از کیفیت مدل-سازی و تنظیم مناسب پارامترها در دوره واسنجی دارد. در شکل ۷ نمودار پراکنشی مقادیر رواناب مشاهده ای و شبیه سازی برای ایستگاه گلینک در دوره صحت سنجی نشان داده شده است که نشان گر همبستگی مناسب میان مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی می باشد.

مدل با استفاده از داده های مشاهداتی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ و با استفاده از مقادیر پیشنهادی پارامترها در دوره واسنجی انجام می‌پذیرد. نتایج صحت‌سنجی مدل در ایستگاه هیدرومتری گلینک (خروجی اصلی حوضه) در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین مقادیر شاخص‌های آماری ضرایب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین  $R^2$  در این دوره در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری مشاهده می‌گردد که اگرچه در دوران صحت سنجی مقادیر پارامترها همان مقادیر حاصل از دوره واسنجی قرار داده



شکل ۵- رواناب مشاهده شده نسبت به رواناب شبیه سازی شده در دوره واسنجی در ایستگاه گلینک

Figure 5. Observed runoff due to simulated runoff values in calibration period for Gelinak station



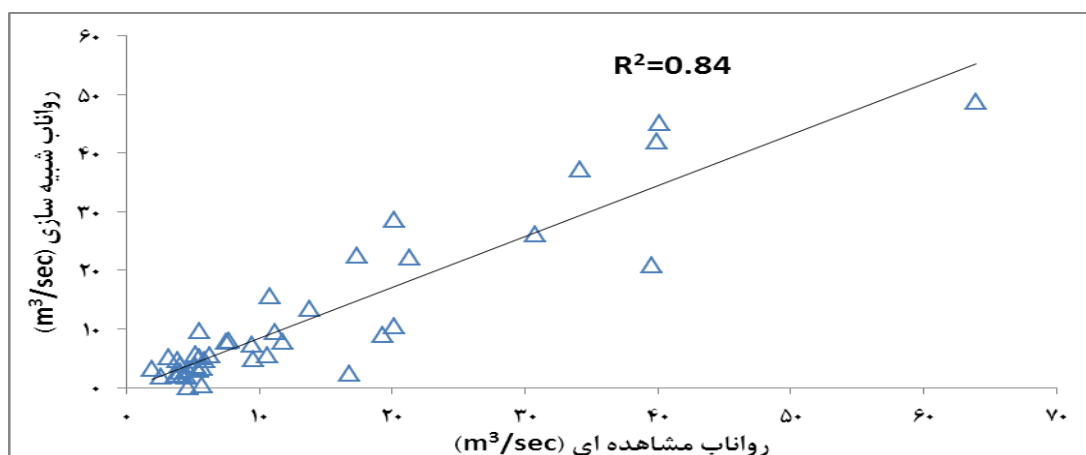
شکل ۶- رواناب سطحی مشاهده و شبیه سازی شده ماهانه در مرحله صحت سنجی در ایستگاه گلینک

Figure 6. Monthly observed and simulated surface runoff in validation period in Gelinak station

جدول ۴- شاخص‌های آماری نش-ساتکلیف و  $R^2$  در دوره صحت سنجی

Table 4. Nash-Sutcliffe and  $R^2$  statistical indexes for validation interval

NS	$R^2$	نام ایستگاه
۰/۷۶	۰/۸۵	گتته ده
۰/۷۳	۰/۷۵	جوستان
۰/۷۹	۰/۸۴	گلینک



شکل ۷- نمودار پراکنشی مقادیر رواناب مشاهده شده در دوره صحت سنجی در ایستگاه گلینک

Figure 7. Scatter chart of observed runoff due to simulated runoff values in validation period in Gelinak station

### نتیجه گیری

ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین  $R^2$  پس از کالیبراسیون در ایستگاه گته ده، جوستان و گلینک (خروجی حوضه) به ترتیب برابر  $0/80$ ،  $0/78$  و  $0/84$  و مقادیر ضریب تعیین  $R^2$  برای این سه ایستگاه به ترتیب برابر  $0/86$ ،  $0/81$  و  $0/87$  برآورد گردیده است. مقادیر این ضرایب نشان دهنده دقت مناسب شبیه سازی حوضه آبخیز مورد مطالعه دارد.

پس از واسنجی مدل، جهت اطمینان از کیفیت مدل سازی به صحت سنجی مدل با استفاده از داده های مشاهداتی سال های  $2011$  تا  $2014$  و با استفاده از مقادیر پیشنهادی پارامترها در دوره واسنجی پرداخته شد. نتایج صحت سنجی مدل نشان از کیفیت مدل سازی و تنظیم مناسب پارامترها در دوره واسنجی دارد. همچنین مقادیر شاخص های آماری ضرایب نش-ساتکلیف (NS) و ضریب تعیین  $R^2$  مقادیر بسیار مناسبی را نشان می دهند. به عنوان مثال در ایستگاه گلینک که خروجی حوضه می باشد، این ضرایب به ترتیب برابر  $0/79$  و  $0/84$  می-باشد. همچنین نمودار پراکنشی مقادیر رواناب مشاهده ای و شبیه سازی برای این سه ایستگاه در دوره صحت سنجی نشان داده شده است که نشان گر همبستگی مناسب میان مقادیر مشاهده ای و شبیه سازی می باشد.

به کارگیری این مدل به دلیل کاهش هزینه عملیات میدانی به-منظور اندازه گیری مولفه های مورد نیاز و به ویژه به دلیل کاهش زمان مورد نیاز برای تحلیل مسایل، جهت ارتقای سطح مدیریت

مدل های بارش- رواناب، ابزارهای مهمی در مطالعات منابع آبی به شمار می آیند. کارایی مدل های مذکور به انتخاب مناسب پارامترهای مدل بستگی دارد. در این مطالعه مدل-سازي حوضه آبخیز طالقان، با استفاده از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) مورد مطالعه قرار گرفت. جهت انجام این کار، اطلاعات مختلفی از قبیل نقشه مدل رقومی ارتفاع، داده های خاک، داده های بارش، دما و هواشناسی و نقشه خاک و کاربری اراضی در فرمت استاندارد به عنوان ورودی به مدل داده شد. پس از انجام آنالیز حساسیت، تعداد ۱۸ پارامتر به عنوان پارامترهایی که مدل نسبت به آنها حساسیت بیشتری دارد، تعیین گردید. با انجام تحلیل حساسیت، مشخص شد که پارامتر شماره منحنی (CN) مهم ترین فاکتور است؛ و پارامترهای ضریب تبخیر خاک (ESCO) و پارامتر ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL\_AWC)، به ترتیب در زمره مهم ترین فاکتورهای کنترل کننده میزان رواناب در حوضه آبخیز می باشند. پس از تعیین حساس ترین پارامترهای مدل، واسنجی مدل با استفاده از الگوریتم SUFI-2 برای سال های آماری  $2000$  تا  $2010$  با استفاده از داده های دبی مشاهداتی سه ایستگاه هیدرومتری در داخل حوضه انجام پذیرفت. ملاحظه گردید مقادیر شبیه سازی، مقادیر مشاهده ای را چه از لحاظ میزان رواناب و چه از لحاظ زمان وقوع پیک ها به خوبی دنبال می نمایند. مقادیر شاخص های آماری شامل ضریب نش-

5. Fadil, A., Rhinane, H., Kaoukaya, A., Kharchaf, Y., Bachir O., 2011. Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. *Journal of Geographic Information System*, Vol. 4, pp. 279-289.
6. Ghoraba, S.M., 2015. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal*. Vol. 54, No. 3, pp. 583-594.
7. Akhavan, S., Abedi-Koupai, J., Mousavi, S.F., Afyuni, M., Eslamian, S.S., Abbaspour, K.C., 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystemes and Environment*, Vol. 139, pp. 675-688.
8. Park, J.Y., Ale, S., Teague, W.R., 2017. Simulated water quality effects of alternate grazing management practices at the ranch and watershed scales. *Ecological Modelling*, Vol. 360, No. 24, pp. 1-13.
9. Kundu, S., Khare, D., Mondal, A., 2017. Past, present and future land use changes and their impact on water balance. *Journal of Environmental Management*, Vol. 197, pp. 582-596.
10. Rostami Kolour, M., Dahrazma, B., Rahimi, M., 2015. Water quality assessment of Taleghan river using NSFQI index. *First National Conference on New Developments in Biological and Agricultural Sciences*, Tehran, Iran. (Persian)
11. Santos, R.M., Sanches Fernandes, L.F., Moura, J.P., Pereira, M.G., Pacheco, F.A.L., 2014. The impact of climate change, human interference, scale and modeling uncertainties on the estimation of aquifer properties and river flow

منابع آب و حفظ محیط زیست بسیار کارآمد می باشد. علاوه بر این، با استفاده از این ابزار این امکان برای پژوهشگران و مدیران اجرایی به وجود می آید تا برنامه‌های مختلف مدیریتی را که امکان اجرای آن‌ها در کوتاه مدت و با هزینه‌های معقول وجود ندارد، را ارزیابی کرده و با تحلیل نتایج بهترین تصمیم را اتخاذ کنند.

## Reference

1. Khalighi Sigarudi, Sh., Zinati Shoaie, T., Salajeghe, A., Kohandel, A., Mortezaei Gh., 2009. Simulating runoff using semi-distributed method in watershed with limited data, case study: Latian watershed. *Proceedings of 5<sup>th</sup> National Conference of Watershed Management Sciences and Engineering (Sustainable Management of Natural Hazard)*, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, pp. 180-188.
2. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams J.R. & King, K.W., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation—version 2009, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center-Texas AgriLife Research.
3. Pinaras, V., Petalas, C., Gikas, G.D., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V.A., 2010. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the soil and water assessment tool (SWAT). *Desalination*, vol. 250, pp. 274-286.
4. Alansi, A.W., Amin, M.S.M., Abdul Halim, G., Sharif, H.Z.M., Aimrun, W., 2009. Validation of SWAT Model for stream flow simulation and forecasting in upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrology and Earth System Sciences, Discuss*, Vol. 6, pp. 7581-7609.

- American Water Resources Association, Vol. 34, No. 1, pp.73-89.
15. Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M., 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 37, No. 5, pp.1169–1188.
16. Abbaspour, K.C., 2008. SWAT-CUP2: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Department of Systems Analysis, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- components. *Journal of Hydrology*, Vol. 519, pp. 1297-1314.
12. Rahman, K., Maringantic, H., Beniston, M., Widmer, F., Abbaspour, K., Lehmann, A., 2013. Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: The Upper Rhone River watershed case in Switzerland. *Water Resources Management*, Vol. 27, No. 2, pp. 323-339.
13. Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., 2002. Integration of watershed tools and SWAT model into basins. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No. 4, pp.1127-1141.
14. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 2000. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *Journal of*