

## تحلیل حساسیت مدل SWAT در حوزه آبخیز قره‌سو اردبیل

فواد ناصرآبادی<sup>۱\*</sup>، اباذر اسمعیلی عوری<sup>۲</sup>، حسین اکبری<sup>۳</sup> و رخساره رستمیان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، <sup>۲</sup> استادیار، دانشکده فناوری کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، <sup>۳</sup> دانشجو دکتری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس و <sup>۴</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۱۹

### چکیده

در مدل‌های هیدرولوژیک با انجام آنالیز حساسیت برای شناسایی پارامترهای مهم، می‌توان تعداد آن‌ها را برای فرایند واسنجی مدل کاهش داده و واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد. این پژوهش، کاربرد یک روش مفید برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT را شرح می‌دهد که با استفاده از آن، پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در نتایج مدل دارند، مشخص شده و برای این پارامترها نسبت حساسیت و همچنین، نمودار ارتباط تغییرات پارامتر با نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌شود. منطقه مورد پژوهش، حوزه آبخیز رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل با مساحتی بالغ بر ۴۰۶۲ کیلومتر مربع می‌باشد. از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب ماهانه در منطقه مورد پژوهش استفاده شد. واسنجی به صورت دستی و بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ و اعتبارسنجی نیز بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ انجام شد. چهار بخش مهم بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق به‌عنوان تابع هدف انتخاب و حساسیت هر پارامتر بر روی آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که پارامترهای شماره منحنی SCS (CN)، ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL\_AWC)، چگالی توده خاک (SOL\_BD)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (SOL\_K)، حداکثر نگه‌داشت تاج پوشش (CANMX)، ضریب تبخیر از لایه‌های خاک (ESCO) و حداقل نرخ ذوب برف در طول سال (SMFMN) در بخش‌های مختلف بیلان آب بیشترین تاثیر را داشتند.

**واژه‌های کلیدی:** چگالی توده خاک، ضریب تبخیر از لایه‌های خاک، ظرفیت آب قابل دسترس خاک، واسنجی، هدایت هیدرولیکی

### مقدمه

زمان کوتاه می‌باشد. مدل‌های هیدرولوژیک دارای پارامترهای متعددی هستند که مقدار این پارامترها بسته به شرایط منطقه و داده‌های ورودی متفاوت است و تا زمانی که مقدار این پارامترها در طی فرایند واسنجی مدل، تخمین‌زده نشود نمی‌توان از مدل در پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی استفاده کرد. در این مدل‌ها با اجرای یک مکانیزم مناسب می‌توان

مدل‌های شبیه‌سازی در طول چند دهه اخیر جایگاه خاصی در دانش بشری به خود اختصاص داده‌اند و کمک فراوانی به‌عنوان ابزار مدیریتی، پایه‌ای و اجرایی ایفا کرده‌اند. از توانایی‌های این مدل‌ها درک بهتر عوامل موثر در فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز و پردازش حجم بالای داده‌ها در مدت

\*مسئول مکاتبه: foadnaserabadi@yahoo.com

همکاران (۲۰۰۷) در تحقیق خود حساس‌ترین پارامترها برای مجموع تولید آب در مدل SWAT را عوامل شماره منحنی، آب قابل دسترس خاک و شاخص جبران تبخیر از لایه‌های خاک به دست آوردند. همچنین، Amani و همکاران (۲۰۰۶) بیان کردند که سه پارامتر شماره منحنی، ظرفیت آب قابل دسترس خاک و شاخص جبران تبخیر خاک تاثیر ویژه‌ای در نتایج آنالیز حساسیت پارامترها دارند. White و Chaubey (۲۰۰۵) مهم‌ترین عوامل موثر در جریان را بر اساس نظر سایر محققین به صورت جدول ۱ بیان کردند.

تعداد پارامترها را برای فرایند واسنجی کاهش داد و با تمرکز بر روی پارامترهای مهم و حساس، واسنجی مدل را سریع‌تر انجام داد.

آنالیز حساسیت برای تعیین این که یک مدل چقدر به تغییر مقدار امتیاز پارامتری از آن و تغییر در ساختار مدل حساس است، انجام می‌شود. با نشان دادن چگونگی تغییر رفتار مدل در جواب به تغییر مقدار پارامترها، آنالیز حساسیت یک ابزار سودمند در ساخت و ارزیابی مدل می‌باشد. در واقع هدف اصلی از آنالیز حساسیت تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند. Feyereisen و

جدول ۱- پارامترهای حساس معرفی شده توسط White و Chaubey (۲۰۰۵) در مدل SWAT

ردیف	نام پارامتر	ردیف	نام پارامتر	ردیف	نام پارامتر
۱	ضریب جذب تاج پوشش	۵	روند رشد گیاه	۹	چگالی توده خاک
۲	ضریب جبران تبخیر خاک	۶	ضریب تبخیر از سفره	۱۰	ضریب جبران برداشت آب گیاه
۳	خصوصیات خاک	۷	آب قابل دسترس خاک	۱۱	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک
۴	خصوصیات آب زبرزمینی	۸	شماره منحنی		

مورد مطالعه ۱۱/۴ درصد است. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز قره‌سو در استان اردبیل را نمایش می‌دهد. **معرفی مدل SWAT:** مدل SWAT توسط Arnold برای اداره خدمات تحقیقات کشاورزی آمریکا<sup>۱</sup> ارائه شد و به معنی ابزاری برای ارزیابی آب و خاک می‌باشد. SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی مکانی و زمان پیوسته است که سعی شده بر اساس روابط فیزیکی تهیه شود و یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی، کیفیت آب، فرسایش خاک، مدیریت مرتع و اثرات تغییرات اقلیم می‌باشد. مدل SWAT قابلیت اجرا در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> را دارد و بنابراین محدودیتی از نظر ورود حجم وسیعی از اطلاعات در مورد حوزه‌های آبخیز وسیع وجود ندارد. در مدل SWAT ابتدا از روی نقشه مدل رقومی ارتفاع<sup>۳</sup>، حوزه آبخیز اصلی به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود.

هدف اصلی در پژوهش حاضر مشخص کردن حساسیت پارامترهای ورودی مدل SWAT بر چهار بخش مهم از بیلان آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، تبخیر و تفرق و آب زیرزمینی و ترسیم نمودار نحوه تاثیر هر پارامتر بر بخش‌های یاد شده در حوزه آبخیز رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل است. با توجه به نتایج این بررسی می‌توان بخش‌های مختلف هیدروگراف را دقیق‌تر شبیه‌سازی کرد.

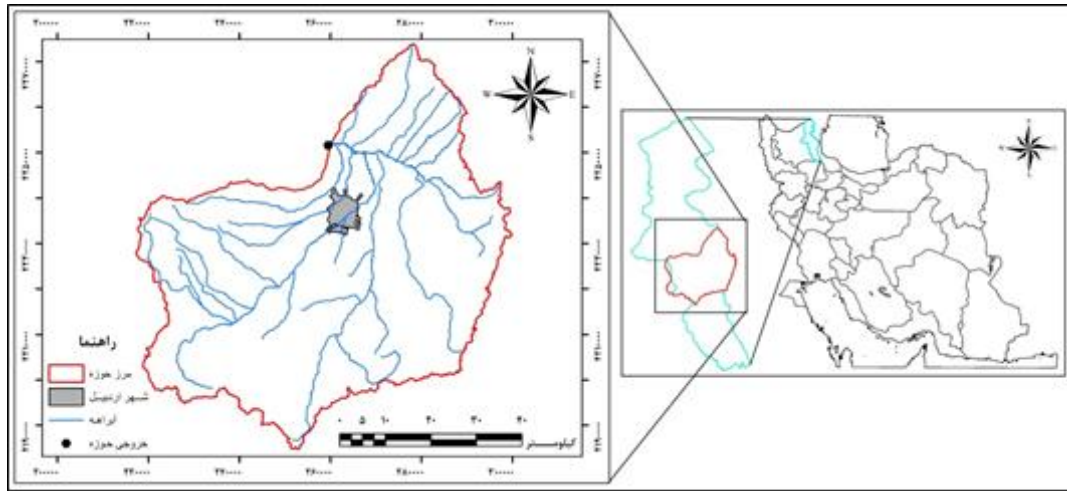
## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد پژوهش:** حوزه آبخیز قره‌سو با مساحتی بالغ بر ۴۰۶۲ کیلومتر مربع در محدوده دشت اردبیل واقع شده است. رودخانه قره‌سو از شاخه‌های مهم رودخانه ارس در خاک ایران می‌باشد و آب‌های منطقه وسیعی از استان اردبیل را جمع‌آوری و به رودخانه ارس می‌رساند. حداقل ارتفاع ۱۲۹۰ متر است که در خروجی حوزه آبخیز در ایستگاه هیدرومتری سامیان واقع شده است. حداکثر ارتفاع ۴۷۸۱ متر و میانگین ارتفاع ۱۷۸۷ متر می‌باشد. شیب متوسط حوزه آبخیز

<sup>۱</sup> USDA Agricultural Research Service (ARS)

<sup>۲</sup> Geographic Information System (GIS)

<sup>۳</sup> Digital Elevation Model (DEM)



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قره‌سو در کشور و استان اردبیل

منحنی SCS و فرمول نفوذ گرین-آمپت<sup>۲</sup>. رابطه SCS به صورت زیر می‌باشد:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2)$$

که در آن،  $Q_{surf}$  رواناب سطحی (mm)،  $R_{day}$  عمق بارش روزانه (mm) و  $S$  پارامتر نگهداشت رطوبت (mm) می‌باشد.  $S$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S = 25.4 \left( \frac{100}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

که در آن،  $CN$  شماره منحنی (بدون بعد) می‌باشد. فرمول نفوذ گرین-آمپت به صورت زیر است:

$$f_{inf,t} = K_e \left( 1 + \frac{\phi_{wf} \Delta \theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (4)$$

که در آن،  $f_{inf,t}$  سرعت نفوذ در زمان  $t$  ( $\text{mmhr}^{-1}$ )،  $K_e$  هدایت هیدرولیکی موثر ( $\text{mmhr}^{-1}$ )،  $\phi_{wf}$  پتانسیل ماتریک جبهه‌ی رطوبتی (mm)،  $\Delta \theta_v$  تغییرات حجم رطوبتی خاک در جبهه رطوبت ( $\text{mmmm}^{-1}$ ) و  $F_{inf,t}$  نفوذ تجمعی در زمان  $t$  (mm) می‌باشد.

**پتانسیل تبخیر و تعرق:** در مدل SWAT سه روش برای محاسبه تبخیر و تعرق وجود دارد. (۱) روش پنمن-مانتیس<sup>۳</sup>، (۲) روش پریستلی-تیلور<sup>۴</sup> و (۳) روش هارگریوز-سامانی<sup>۵</sup>. پارامترهای مورد نیاز روش پنمن-مانتیس شامل دمای هوا، تشعشع خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد می‌باشد. روش پریستلی-تیلور به

سپس بر مبنای نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و توپوگرافی زیرحوضه‌ها به واحدهای کوچک‌تری تقسیم می‌شوند که به هر کدام از این واحدها، واحد پاسخ هیدرولوژیک<sup>۱</sup> می‌گویند. خروجی‌های مدل مانند رواناب سطحی در هر زیرحوضه از جمع رواناب سطحی محاسبه شده برای هر واحد هیدرولوژیکی، به روش متوسط وزنی به دست می‌آید.

مدل SWAT مجموعه‌ای از معادلات ریاضی و فرمول‌های تجربی متعدد است (Neitsch و همکاران، ۲۰۰۲) که در این‌جا فرایندهای مهم مدل به اختصار بیان می‌شود.

**چرخه هیدرولوژی:** چرخه هیدرولوژی که به وسیله مدل SWAT شبیه‌سازی می‌شود، بر پایه رابطه بیلان آبی می‌باشد:

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

که در آن،  $SW_t$  مقدار نهایی آب در خاک (mm)،  $SW_0$  مقدار اولیه آب در خاک ( $R_{day}$ ، mm) مقدار بارندگی در روز  $t$ ام ( $Q_{surf}$ ، mm) مقدار رواناب سطحی در روز  $t$ ام  $E_a$ ، (mm) مقدار تبخیر و تعرق در روز  $t$ ام ( $W_{seep}$ ، mm) مقدار آبی که از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع در روز  $t$ ام وارد می‌شود (mm) و  $Q_{gw}$  مقدار جریان برگشتی در روز  $t$ ام (mm) می‌باشد.

**رواناب سطحی:** در مدل SWAT دو روش برای تخمین رواناب سطحی وجود دارد، روش شماره

<sup>2</sup> Green and Ampt

<sup>3</sup> Penman-Monteith

<sup>4</sup> Priestley-Taylor

<sup>5</sup> Hargreaves-Samani

<sup>1</sup> Hydrologic Response Unit (HRU)

دام  $Q_{gw}$  (mm)، جریان آب زیرزمینی (جریان پایه) در روز  $t$  نام  $W_{revap}$  (mm)، برگشت جریان از سفره‌های کم‌عمق به پروفیل خاک در روز  $t$  نام  $W_{deep}$  (mm)، مقدار جریان آبی که از سفره‌های کم‌عمق به سفره‌های عمیق در روز  $t$  نام وارد می‌شود (mm) و  $W_{pump,sh}$  مقدار آب خارج شده از پروفیل کم‌عمق خاک به وسیله پمپاژ (mm) می‌باشد.

**داده‌های ورودی مدل:** اطلاعات مورد نیاز مدل شامل متغیرهای مکانی و متغیرهای هیدروکلیماتولوژی و عددی می‌باشد. متغیرهای مکانی شامل نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک‌شناسی می‌باشد که از اداره کل منابع طبیعی استان اردبیل با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شد. متغیرهای هیدروکلیماتولوژی و عددی مشتمل بر اطلاعات هواشناسی می‌باشد. اطلاعات هواشناسی شامل داده‌های روزانه بارش، دما و رطوبت نسبی است که از سازمان پایه مطالعات منابع آب و سازمان هواشناسی استان تهیه شد. ایستگاه‌های درون منطقه‌ای هواشناسی قابل استفاده، شامل ۱۱ ایستگاه است که شامل یک ایستگاه سینوپتیک اردبیل و هشت ایستگاه تبخیرسنجی آبی-بیگلو، آتشگاه، سامیان، سد قوری‌چای، لای، نئور، نمین و نیر و دو ایستگاه باران‌سنجی بقرآباد و سیاه‌پوش می‌باشد.

برای شروع کار با مدل، ابتدا نقشه DEM و نقشه-های زیرحوضه‌ها و شبکه آبراه‌های که قبلاً آماده شده بودند به محیط نرم‌افزار مدل فراخوانده شدند. در مرحله بعد نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب در محیط نرم‌افزار مدل، هم‌پوشانی داده شدند و واحدهای پاسخ هیدرولوژیک تعریف شدند. حاصل کار این مرحله تشکیل ۱۷۸۶ واحد پاسخ هیدرولوژیک بود. لازم به ذکر است نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و طبقات شیب در فرمت رستری و با اندازه سلول‌های ۲۵ در ۲۵ متر تهیه شدند و در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. پس از تعریف واحدهای پاسخ هیدرولوژیک، داده‌های هواشناسی وارد مدل شد.

برای انجام آنالیز حساسیت روش "یک پارامتر در هر بار"<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت که متعارف‌ترین روش برای این کار می‌باشد و محققین مختلفی از

دمای هوا، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی نیاز دارد و روش هارگریوز-سامانی فقط به دمای هوا نیاز دارد.

**جریان جانبی:** مدل SWAT از یک مدل ذخیره جنبشی برای جریان زیرسطحی استفاده می‌کند که توسط Sloan و همکاران در سال ۱۹۸۳ توسعه یافته است. این مدل، جریان زیرسطحی را در یک مقطع دو بعدی و در مسیر جریان به طرف پایین یک تپه شیب‌دار شبیه‌سازی می‌کند. در تخمین موج جنبشی جریان زیرسطحی اشباع یا جریان جانبی، فرض می‌شود که خطوط جریان در منطقه اشباع با مرز غیراشباع موازی است و شیب هیدرولیکی برابر شیب بستر است. در نهایت، دبی در خروجی از شیب تپه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{lat} = 0.024 \left( \frac{2SW_{ly,excess}K_{sat}slp}{\phi_d L_{hill}} \right) \quad (5)$$

که در آن،  $Q_{lat}$  دبی در خروجی تپه ( $\text{mmday}^{-1}$ )،  $SW_{ly,excess}$  مقدار آب قابل زهکشی در لایه‌ی مورد نظر ( $\text{mm}$ )،  $K_{sat}$  هدایت هیدرولیکی اشباع ( $\text{mmhr}^{-1}$ )،  $slp$  شیب ( $\text{mm}^{-1}$ )،  $\phi_d$  تخلخل قابل زهکشی خاک ( $\text{mmmm}^{-1}$ ) و  $L_{hill}$  طول تپه (m) می‌باشد.

**جریان آب زیرزمینی:** در مدل SWAT بیلان آبی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیک به وسیله چهار حجم ذخیره شامل برف، لایه پروفیل خاک (عمق ۲-۰ متری)، لایه سفره‌های کم‌عمق و لایه سفره‌های عمیق محاسبه می‌شود. جریان در این لایه‌ها رواناب سطحی، جریان تاخیری پروفیل خاک و جریان برگشتی از سفره‌های عمیق می‌باشد. نفوذ آب در پروفیل خاک برای پر کردن سفره‌های کم‌عمق فرض شده است. به محض نفوذ آب به سفره‌های عمیق، سیستم شبیه‌سازی آن را تلف شده تلقی کرده و نمی‌تواند برگرداند. بیلان آبی برای سفره‌های کم‌عمق، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + W_{rchr} - Q_{gw} - W_{revap} - W_{deep} - W_{pump,sh} \quad (6)$$

که در آن،  $aq_{sh,i}$  مقدار آب ذخیره شده در سفره‌های کم‌عمق در روز  $t$  نام  $aq_{sh,i-1}$  (mm)، مقدار آب ذخیره شده در سفره‌های کم‌عمق در روز  $t-1$  نام  $W_{rchr}$  (mm)، مقدار آب وارد شده به آبخوان در روز

<sup>1</sup> One Factor At a Time (OAT)

بر اساس بررسی‌های اولیه مدل و نتایج تحقیقات پیشین از قبیل Breierova و همکاران (۱۹۹۶)، Confesor و Remegio (۲۰۰۵)، Chaubey و White (۲۰۰۷) و Feyereisen و همکاران (۲۰۰۷) از بین بیش از ۱۰۰ پارامتر ورودی مدل، ۲۶ پارامتر برای انجام آنالیز حساسیت انتخاب شد (جدول ۲).

به‌منظور مقایسه داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل و ارزیابی مدل در شبیه‌سازی جریان، داده‌های روزانه جریان (مترمکعب بر ثانیه) ایستگاه‌های هیدرومتری سامیان، پل الماس و یامچی از سازمان مطالعات پایه منابع آب استان اردبیل جمع‌آوری شد. شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی در حوزه آبخیز مورد مطالعه را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی بر اساس آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ صورت گرفت که از این هشت سال دوره شبیه‌سازی، آمار سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ یعنی شش سال دوره آماری، برای مرحله واسنجی و آمار سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ یعنی دو سال دوره آماری، برای مرحله اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. در نهایت، دقت شبیه‌سازی مدل با استفاده از ضرایب تبیین<sup>۱</sup> و نش-ساتکلiffe<sup>۲</sup> بررسی شد.

### نتایج و بحث

مقادیر بهینه هر یک از پارامترها که در مرحله واسنجی بر اساس آن‌ها بهترین دقت شبیه‌سازی حاصل شد، در جدول ۳ ارائه شده است.

**حساسیت نسبی پارامترها بر اجزای بیلان آب:**  
حساسیت هر یک از پارامترهای انتخاب شده، بر چهار بخش رواناب سطحی، جریان جانبی، آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق در جداول ۴ تا ۷ ارائه شده است.  
بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، پارامترهای شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II (CN2)، ظرفیت آب قابل دسترس خاک (SOL\_AWC)، چگالی توده خاک (SOL\_BD)، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (SOL\_K)، حداکثر نگاه‌داشت تاج پوشش (CANMX)، ضریب تبخیر از لایه‌های خاک (ESCO)

جمله White و همکاران (۲۰۰۵)، Jha و همکاران (۲۰۰۷) و Feyereisen و همکاران (۲۰۰۷) از این روش استفاده کرده‌اند. در روش OAT در هر بار اجرای مدل یک پارامتر تغییر کرده و بقیه ثابت می‌مانند و اثر آن تغییر بر تابع هدف، حساسیت پارامتر را مشخص می‌کند (Confesor و Remegio، ۲۰۰۷). در فایل متنی نتایج مدل، بیلان سالانه آب برای کل دوره شبیه‌سازی ارائه می‌شود که شامل تولید رواناب سطحی، جریان جانبی، تبخیر و تعرق، جریان آب زیرزمینی کم‌عمق و جریان آب زیرزمینی عمیق می‌باشد. با توجه به نتایج این بخش، حساسیت پارامترها بررسی شدند.

در این پژوهش در دو مرحله، آنالیز حساسیت انجام شد. مرحله اول قبل از واسنجی مدل، زمانی بود که نیاز به شناخت خصوصیات پارامترها و نحوه تاثیر آن‌ها بر تولید آب بود و مرحله دوم بعد از واسنجی مدل و برای شناخت مقدار حساسیت هر یک از پارامترها بر دقت شبیه‌سازی بود. بر این اساس در مرحله اول یعنی قبل از واسنجی مدل، حساسیت پارامترهای ورودی بر چهار بخش مهم چرخه آب شامل رواناب سطحی، جریان جانبی، تبخیر و تعرق و آب زیرزمینی مورد آنالیز قرار گرفت. برای این کار از رابطه حساسیت نسبی ارائه شده توسط Feyereisen و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد (رابطه ۷). برای تعیین مقادیر ورودی هر پارامتر، دامنه تغییر آن مشخص و در این دامنه چهار عدد با فاصله گام‌های مختلف انتخاب و پس از ارائه آن‌ها به مدل، شبیه‌سازی انجام شد. البته در مورد برخی از پارامترها برای بهتر مشخص شدن عملکرد پارامتر، تعداد نقاط بیشتری بررسی شد. شاخص حساسیت نسبی ( $S_r$ ) بیانگر نسبت تغییر تابع خروجی در قبال تغییر پارامترهای ورودی است (Feyereisen و همکاران، ۲۰۰۷).  $S_r$  به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_r \cong \frac{[(O_{p+\Delta p}) - (O_{p-\Delta p}) / O_p]}{2\Delta P / P} \quad (7)$$

که در آن،  $S_r$  بیانگر حساسیت نسبی،  $P$  مقدار پارامتر و  $O$  مقدار تابع هدف استخراج شده از نتیجه مدل می‌باشد.

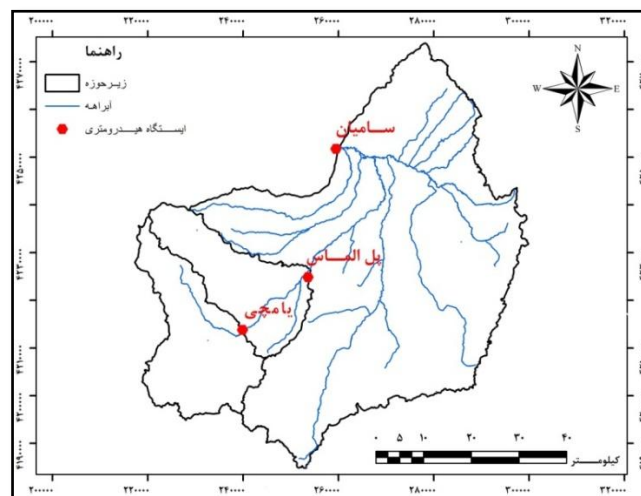
<sup>1</sup> Coefficient of determination ( $R^2$ )

<sup>2</sup> Nash-Sutcliffe ( $E_{NS}$ )

و حداقل نرخ ذوب برف در طول سال (SMFMN) در بخش‌های مختلف بیلان آب بیشترین تاثیر را داشتند.

جدول ۲- پارامترهای انتخاب شده برای آنالیز حساسیت

نام پارامتر	شرح پارامتر	واحد	محدوده تغییرات	مقادیر پیش فرض مدل
CN2	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	-	۳۵-۹۸	۳۵-۹۸
SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	mm/mm	۰-۱	۰-۱
SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	mm/hr	۰-۲۰۰۰	۰-۲۰۰۰
SOL_BD	چگالی توده خاک	g/cm <sup>3</sup>	۰/۹-۲/۵	۰/۹-۲/۵
ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	-	۰-۱	۰-۱
EPCO	فاکتور جبران جذب گیاهی	-	۰-۱	۰-۱
ALPHA_BNK	ثابت تخلیه کانال	day	۰-۱	۰-۱
SFTMP	دمای بارش برف	°C	±۵	±۵
SMTMP	دمای ذوب برف	°C	±۵	±۵
SMFMX	حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال	mm/°C-day	۰-۱۰	۰-۱۰
SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	mm/°C-day	۰-۱۰	۰-۱۰
TIMP	فاکتور تاخیر دمای برف‌پشته	-	۰-۱	۰-۱
SLSUBBSN	میانگین طول شیب	m	۱۰-۱۵۰	۱۰-۱۵۰
SURLAG	ضریب تاخیر رواناب سطحی	-	۱-۲۴	۱-۲۴
OV_N	ضریب زبری مانینگ برای جریان سطحی	-	۰/۰۱-۳۰	۰/۰۱-۳۰
CH_K2	هدایت هیدرولیکی موثر بستر کانال اصلی	mm/hr	-۰/۰۱-۵۰۰	-۰/۰۱-۵۰۰
CH_N2	ضریب مانینگ برای جریان در کانال اصلی	-	-۰/۰۱-۰/۳	-۰/۰۱-۰/۳
LAT_TIME	زمان تاخیر رسیدن جریان‌های زیرسطحی به رودخانه	day	۰-۱۸۰	۰-۱۸۰
GW_DELAY	زمان تاخیر آب زیرزمینی	day	۰-۵۰۰	۰-۵۰۰
ALPHA_BF	ثابت تخلیه آب زیرزمینی	day	۰-۱	۰-۱
GWQMIN	حداقل مقدار ذخیره آب در سفره کم‌عمق که برای رخ دادن جریان پایه، لازم است	mm	۰-۵۰۰۰	۰-۵۰۰۰
GW_REVAP	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	-	۰/۰۲-۰/۲	۰/۰۲-۰/۲
RCHRG_DP	نفوذ به سفره عمیق	-	۰-۱	۰-۱
GWHT	ارتفاع سطح اولیه آب زیرزمینی	m	۰-۲۵	۰-۲۵
GW_SPYLD	ضریب آبدهی ویژه سفره کم‌عمق	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	۰-۰/۴	۰-۰/۴
CANMX	حداکثر نگره‌داشت تاج‌پوشش (برگاب)	mm	۰-۱۰۰	۰-۱۰۰



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز قره‌سو

جدول ۳- مقادیر بهینه شده پارامترها در مرحله واسنجی رواناب ماهانه

مقدار پارامتر	واحد	شرح پارامتر	نام پارامتر
۶۰-۷۰	-	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	CN2
۰/۳-۰/۴	mm/mm	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	SOL_AWC
۱۵-۳۰	mm/hr	هدایت هیدرولیکی اشباع	SOL_K
۱-۱/۲	g/cm <sup>3</sup>	چگالی توده خاک	SOL_BD
۰/۱-۰/۲	-	فاکتور جبران تبخیر از خاک	ESCO
۲-۳	°C	دمای بارش برف	SFTMP
۰-۰/۵	°C	دمای ذوب برف	SMTMP
۰/۱-۰/۲۵	mm/°C - day	حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال	SMFMX
۰-۱	mm/°C - day	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	SMFMN
۰/۰۱-۰/۱	days	ثابت تخلیه آب زیرزمینی	ALPHA_BF
۰/۲-۰/۴	-	درصد نفوذ به سفره عمیق	RCHRG_DP
۸۰-۹۵	mm	حداکثر نگره‌داشت تاج پوشش (برگاب)	CANMX

جدول ۴- ترتیب و نسبت حساسیت هر یک از پارامترها بر تولید رواناب سطحی

رتبه	نام پارامتر	شرح پارامتر	نسبت حساسیت (S <sub>r</sub> )
۱	CN2	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	۴/۶۱
۲	SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	۰/۵۸
۳	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰/۳۲
۴	SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۰۷
۵	SOL_BD	چگالی توده خاک	۰/۰۶
۶	CANMX	حداکثر نگره‌داشت تاج پوشش (برگاب)	۰/۰۴
۷	SMTMP	دمای ذوب برف	۰/۰۴
۸	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/۰۳

جدول ۵- ترتیب و نسبت حساسیت هر یک از پارامترها بر تولید جریان جانبی

رتبه	نام پارامتر	شرح پارامتر	نسبت حساسیت (S <sub>r</sub> )
۱	SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۷۶
۲	CN2	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	۰/۷۵
۳	SOL_BD	چگالی توده خاک	۰/۶۳
۴	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰/۲۷
۵	CANMX	حداکثر نگره‌داشت تاج پوشش (برگاب)	۰/۱۳
۶	SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	۰/۰۲
۷	SMTMP	دمای ذوب برف	۰/۰۲
۸	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/۰۱

این پارامتر، در یک روند نمایی، مقدار رواناب سطحی، جریان جانبی و تبخیر و تعرق را تغییر می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش مقدار CN2، رواناب سطحی افزایش و جریان جانبی و تبخیر و تعرق کاهش می‌یابند. مقدار آب زیرزمینی در برابر تغییر مقدار CN2 حساسیت چندانی نشان نمی‌دهد. بر این اساس در جریان واسنجی مدل پارامتر CN2 باید در شبیه-

**نمودارهای عملکرد پارامترها:** نحوه تاثیر پارامترها (پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در نتایج مدل داشتند) بر اجزای بیلان آب در شکل ۳ نمایش داده شده است. در هر یک از نمودارها شیب بیشتر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آن بخش می‌باشد.

نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد پارامتر CN2 بیشترین تاثیر را بر تولید رواناب می‌گذارد. تغییر مقدار

سازی حجم رواناب مورد توجه ویژه قرار گیرد، ولی برای کنترل جریان پایه نمی‌تواند حائز اهمیت باشد.

جدول ۶- ترتیب و نسبت حساسیت هر یک از پارامترها بر تولید آب زیرزمینی

رتبه	نام پارامتر	شرح پارامتر	نسبت حساسیت ( $S_p$ )
۱	RCHRG_DP	درصد نفوذ به سفره عمیق	۱/۷۴
۲	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۱/۱۲
۳	CN2	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	۰/۴۸
۴	SOL_BD	چگالی توده خاک	۰/۲۹
۵	SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۱۳
۶	ALPHA_BF	ثابت تخلیه آب زیرزمینی	۰/۰۹
۷	GW_REVAP	ضریب تبخیر آب زیرزمینی	۰/۰۷
۸	CANMX	حداکثر نگره‌داشت تاج پوشش (برگاب)	۰/۰۵
۹	SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	۰/۰۳
۱۰	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/۰۲
۱۱	SMTMP	دمای ذوب برف	۰/۰۱

جدول ۷- ترتیب و نسبت حساسیت هر یک از پارامترها بر تبخیر و تعرق

رتبه	نام پارامتر	شرح پارامتر	نسبت حساسیت ( $S_p$ )
۱	CN2	شماره منحنی SCS برای شرایط رطوبتی II	۰/۲۷
۲	SOL_BD	چگالی توده خاک	۰/۱۲
۳	SOL_AWC	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۰/۰۶
۴	SOL_K	هدایت هیدرولیکی اشباع	۰/۰۲
۵	SMFMN	حداقل نرخ ذوب برف در طول سال	۰/۰۱
۶	ESCO	فاکتور جبران تبخیر از خاک	۰/۰۱
۷	CANMX	حداکثر نگره‌داشت تاج پوشش (برگاب)	۰/۰۱

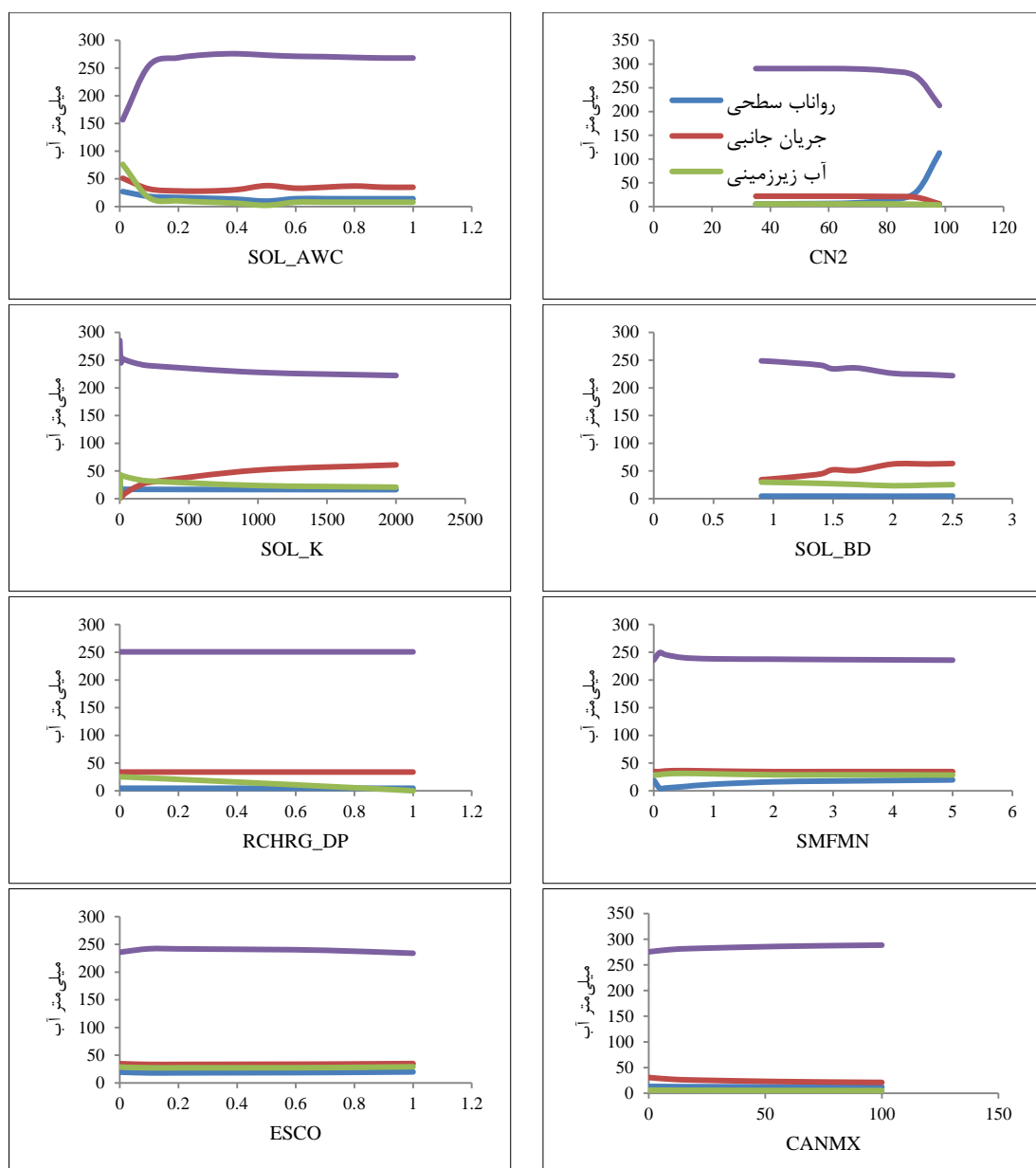
سومین پارامتر حساس، چگالی توده خاک ( $SOL_{BD}$ ) می‌باشد. نمودار عملکرد این پارامتر نشان می‌دهد که با افزایش مقدار این پارامتر مقدار جریان جانبی افزایش و آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. با افزایش چگالی توده خاک نسبت ماده خشک به حجم خاک افزایش یافته و امکان حرکت عمقی آب در لایه‌های خاک کاهش می‌یابد. در نتیجه از مقدار آب زیرزمینی کاسته شده و به مقدار جریان جانبی افزوده می‌شود.

چهارمین پارامتر حساس، هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد. با افزایش پارامتر  $SOL_{K}$  امکان حرکت آب در بین لایه‌های خاک افزایش می‌یابد و در نتیجه بیشتر آب نفوذ کرده به داخل خاک به صورت جریان جانبی حرکت می‌کند و مقدار کمتری به لایه‌های عمیق تر و آب زیرزمینی می‌رسد.

بررسی پارامتر  $SOL_{AWC}$  نشان می‌دهد که این پارامتر همه بخش‌های بیلان آب را تحت تاثیر قرار می‌دهد و از نظر حساسیت نسبی، دومین پارامتر حساس می‌باشد. با افزایش مقدار این پارامتر، گیاه می‌تواند مقدار بیشتری آب را از توده خاک جذب کند که در نتیجه آن، مقدار تبخیر و تعرق افزایش و مقدار آب در توده خاک کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار آب نفوذ یافته به لایه‌های پایینی کاهش می‌یابد که در نتیجه آن مقدار آب زیرزمینی نیز کم می‌شود.

تاثیر این پارامتر بر جریان جانبی را به این شکل می‌توان تفسیر کرد که با افزایش مقدار پارامتر و افزایش تبخیر و تعرق، مقدار آب در لایه زیرقشری کاهش می‌یابد. پارامتر  $SOL_{AWC}$  در همه بخش‌های بیلان آب مهم بوده و بنابراین در مرحله واسنجی نیز حائز اهمیت است.





شکل ۳- تاثیر تغییرات پارامترها بر اجزای بیلان آب

آبخیز خواهد داشت. در فرایند واسنجی مدل، توصیه می‌شود فقط برای کنترل آب پایه به این پارامتر توجه شود.

پارامتر CANMX عاملی است که برای محاسبه مقدار نگهداشت آب در تاج پوشش گیاهی استفاده می‌شود. با افزایش نگهداشت آب در تاج پوشش گیاهی، مقدار رواناب سطحی کاهش و تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد.

پارامتر ESCO ضریبی است که عمق لایه خاک مشارکت‌کننده در فرایند تبخیر را کنترل می‌کند. افزایش این پارامتر باعث کاهش تبخیر از لایه خاک

پارامتر نرخ ذوب برف (SMFMN) در مناطق سردسیر، حساس و تاثیرگذار خواهد بود. اگر نرخ ذوب برف کم باشد، ماندگاری برف در سطح زمین بیشتر می‌شود و در نتیجه، تبخیر آب کمتر و مقدار نفوذ آب به لایه‌های عمیق‌تر خاک و سفره زیرزمینی افزایش می‌یابد و در مقابل سهم رواناب سطحی کمتر می‌شود. پارامتر RCHRG\_DP که نسبت نفوذ آب از سفره کم‌عمق به سفره عمیق را کنترل می‌کند، در بخش‌های غیر از آب زیرزمینی هیچ تاثیری ندارد. در مناطقی که جریان آب زیرزمینی آن بالاست، این پارامتر تأثیر زیادی در مجموع جریان خروجی از حوزه

حساسیت، اگر تاثیرگذاری پارامتر بر تابع هدف به صورت غیرخطی باشد، در نقاطی که شدت یا جهت تاثیر پارامتر بر تابع هدف تغییر می کند، تمرکز کرده و اثر پارامتر را در نقاط بیشتری بررسی کند. بدیهی است که در نمودارهای ترسیم شده برای هر پارامتر، شیب بیشتر منحنی نشان دهنده حساسیت بیشتر پارامتر است.

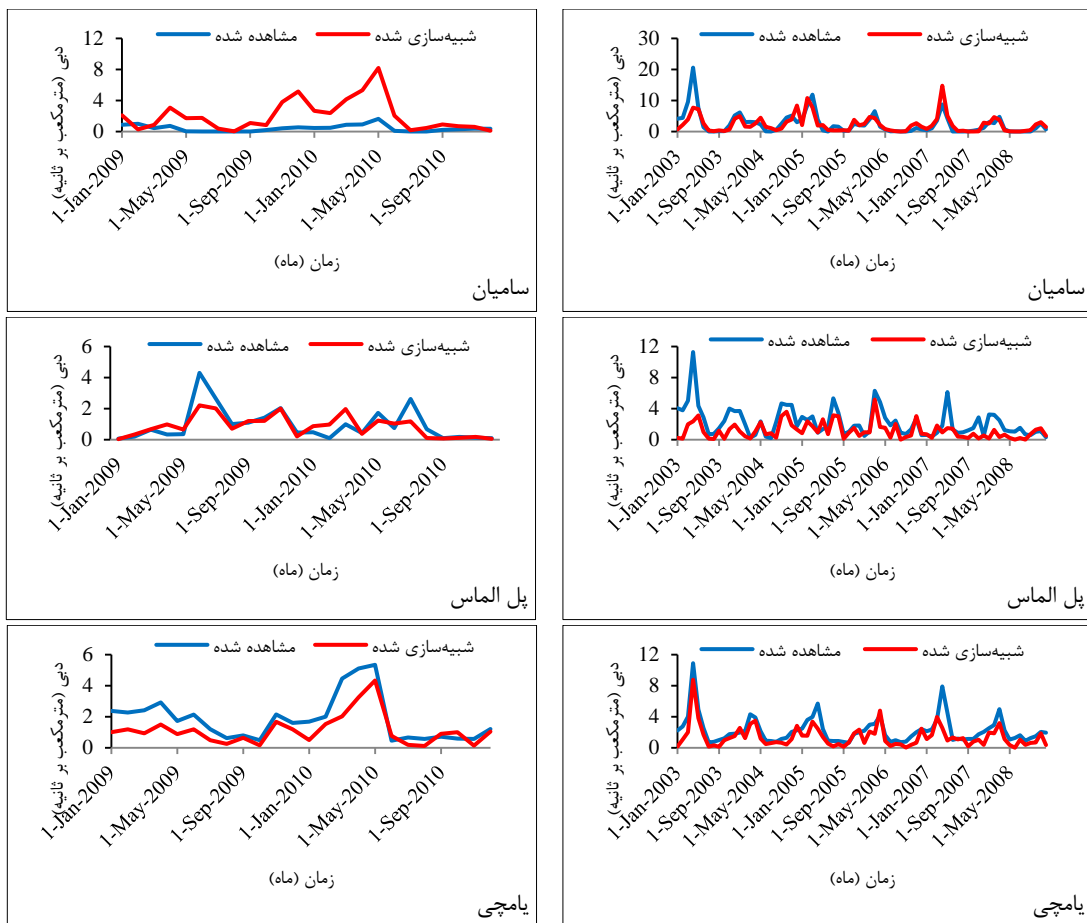
با توجه به این که هدف اصلی مقاله حاضر بیان روش تحلیل حساسیت و ارائه نتایج آن می باشد، بنابراین فقط به منظور کسب اطلاعات بیشتر از قابلیت های مدل SWAT، اشاره ای کلی به نتایج شبیه سازی جریان شامل هیدروگراف ماهانه رواناب در دوره های واسنجی و اعتبارسنجی و دقت شاخص های ارزیابی در هر دو دوره می شود.

هیدروگراف های شبیه سازی شده در مقیاس ماهانه در شکل ۴ نمایش داده شده است. نتایج شاخص های ارزیابی مدل نیز در جدول ۸ قابل مشاهده است.

شده و در پی آن آب باقی مانده در خاک به صورت جریان جانبی و یا نفوذ از محل خارج می شود. این پارامتر همه بخش ها را تحت تاثیر قرار می دهد ولی در کنترل تبخیر و تعرق اهمیت بیشتری دارد.

بررسی دستی حساسیت پارامترها، امکان ترسیم نمودار عملکرد پارامترها را میسر می سازد که با استفاده از آن ها کاربر می تواند اثر تغییرات هر پارامتر را بر تابع هدف مشاهده و مقدار مناسب آن را برای واسنجی مدل انتخاب کند.

در این شرایط می توان گفت که حساسیت پارامتر به صورت توزیعی بررسی شده است، در صورتی که در روش های مرسوم برای آنالیز حساسیت معمولاً یک امتیاز حساسیت برای هر پارامتر به دست می آید و می توان گفت که در این حالت حساسیت پارامتر به صورت توده ای بررسی شده است و شناختی از نحوه اثر پارامتر در طول دامنه تغییرات آن حاصل نمی شود. در روش استفاده شده کاربر می تواند با توجه به نمودار



شکل ۴- هیدروگراف مشاهده و شبیه سازی شده جریان ماهانه در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل

جدول ۸- نتایج شاخص‌های ارزیابی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل

شاخص‌های آماری		تعداد داده	نام ایستگاه	مرحله
$E_{NS}$	$R^2$			
۰/۵۸	۰/۶۸	۷۲	سامیان	واسنجی
۰/۰۹	۰/۳۴	۷۲	پل الماس	
۰/۵۱	۰/۷	۷۲	یامچی	
-۰/۳۳	۰/۵۳	۲۴	سامیان	اعتبارسنجی
۰/۶	۰/۶۳	۲۴	پل الماس	
۰/۵۱	۰/۸۲	۲۴	یامچی	

این ایستگاه‌ها را شبیه‌سازی کرده است. در مجموع، اگر چه ضرایب تبیین برای تمام ایستگاه‌ها در حد قابل قبول می‌باشد ولی مقدار ضریب نش-ساتکلیف برای ایستگاه پل الماس غیرقابل قبول است. این موضوع نشان می‌دهد که اولاً مدل رواناب ماهانه را برای ایستگاه پل الماس خوب شبیه‌سازی نکرده است و ثانیاً تنها با استفاده از یک شاخص آماری نمی‌توان توانایی مدل را مورد بررسی قرار داد.

بر اساس نتایج شاخص‌های ارزیابی، شبیه‌سازی رواناب ماهانه در مرحله واسنجی برای ایستگاه‌های سامیان و یامچی و در مرحله اعتبارسنجی برای ایستگاه‌های یامچی و پل الماس قابل قبول می‌باشد.

ضریب تبیین به‌دست آمده در مرحله واسنجی رواناب ماهانه ۰/۳۴، ۰/۶۸ و ۰/۷۰ می‌باشد که به ترتیب متعلق به ایستگاه‌های پل الماس، سامیان و یامچی می‌باشد. با توجه به تعداد داده‌های رواناب استفاده شده برای هر ایستگاه، این ضریب برای تمام ایستگاه‌ها در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. مقدار ضریب نش-ساتکلیف برای ایستگاه پل الماس ۰/۰۹ است که این مقدار نشان می‌دهد، مدل قادر به شبیه‌سازی رواناب ماهانه در این ایستگاه نبوده است. مقدار این ضریب برای دو ایستگاه یامچی و سامیان به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۵۸ می‌باشد و نشان‌دهنده این است که مدل به‌صورت رضایت‌بخشی رواناب ماهانه

#### منابع مورد استفاده

1. Amani, N., M. Tajrishi and A. Abrishamchi. 2006. River flow simulation using SWAT model and GIS. 7th International River Engineering Conference, Shahid Chamran University of Ahvaz, 1-8 (in Persian).
2. Breierova, L. and M. Choudhari. 1996. An introduction to sensitivity analysis. Massachusetts Institute of Technology, 107 pages.
3. Feyereisen, G.W., T.C. Strickland, D.D. Bosch and D.G. Sullivan. 2007. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the little river watershed. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50: 843-855.
4. Jha, M.K., P.W. Gassman and J.G. Arnold. 2007. Water quality modeling for the Raccon River watershed, using SWAT. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 50(2): 479-493.
5. Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King. 2002. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 458 pages.
6. Remegio, B. and J. Confesor. 2007. Sensitivity analysis and interdependence of the SWAT model parameters. Written for presentation at the 2007 ASABE Annual International Meeting Sponsored by American Society of Agricultural and Biological Engineers Minneapolis Convention Center, Minneapolis, Minnesota.
7. White, K.L. and I. Chaubey. 2005. Sensitivity analysis, calibration and validation for a malt sit and multivariable SWAT model. Journal of the American Water Resources Association, 41(5): 1077-1089.