



سخن از دور

و

GIS ایران



سال سوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۰  
Vol.3, No.2, Summer 2011

سنجش از دور و GIS ایران  
Iranian Remote Sensing & GIS

۱-۱۸

## مدل سازی هیدرولوژیک حوضه طالقان در محیط GIS با استفاده از مدل SWAT

مهران شایگان<sup>۱</sup>، عباس علیمحمدی\*<sup>۲</sup>، حامد روحانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری GIS، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. استادیار گروه مهندسی GIS، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۳. استادیار گروه منابع طبیعی، مجتمع آموزش عالی گنبد

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۵/۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۸/۲

### چکیده

به منظور مدیریت بهینه حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه در حوضه‌های آبخیز کوهستانی که فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری به تعداد کافی‌اند، شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی دارای اهمیت فراوانی است. هدف از این تحقیق، بررسی قابلیت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و ارزیابی مدل نیمه‌توزیعی فیزیکی (SWAT (Soil and Water Assessment Tool) در حوضه طالقان با انواع خاک و کاربری‌های مختلف است. بدین منظور داده‌های آب و هواشناسی، کاربری اراضی و مدل رقومی ارتفاع منطقه تحقیق مطابق با استانداردهای مدل تهیه شد و برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدل و همچنین واسنجی و اعتبارسنجی، مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل حساسیت مدل بر اساس روش لاتین هابیر کیوب (LH\_OAT) به منظور ارزیابی تغییرپذیری دبی رواناب در واکنش به تغییرات پارامترهای ورودی انجام شد. تحلیل حساسیت نشان داد که پارامتر شماره منحنی (CN) مهم‌ترین فاکتور و پارامترهای ظرفیت آب قابل دسترس در لایه خاک (SOL\_AWC)، پارامتر درجه حرارت ذوب برف (SMTMP) و پارامتر جبران تیخیر از خاک (ESCO) به ترتیب حساسیت بیشتری دارند. واسنجی مدل برای دوره زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲ انجام گرفت، و اعتبارسنجی مدل برای دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵. کارایی مدل با استفاده از مقایسه بصری پلات‌های سری زمانی و شاخص‌های آماری شامل ناش - ساتکلیف (NS)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، و درصد انحراف (PBIAS) و همچنین آزمون هم‌قواری ارزیابی گردید. در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، ضرایب NS و  $R^2$  و PBIAS در محل ایستگاه گلینک (خروجی حوضه) به ترتیب برابر ۰/۸، ۰/۹۳ و ۱۴/۸- و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۴، ۰/۸۸ و ۲- به دست آمدند. نتایج آزمون t نیز نشان داد که در سطح اعتماد ۹۵ درصد، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر شبیه‌سازی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی وجود ندارد. در مجموع، نتایج تحقیق حاکی از آن‌اند که مدل قابلیت بالایی برای پیش‌بینی دبی جریان ماهانه حوضه طالقان دارد.

**کلیدواژه‌ها:** مدل‌سازی، رواناب، واسنجی، اعتبارسنجی، SWAT.

\* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری، گروه GIS

## ۱- مقدمه

مدیریت صحیح حوضه‌های آبخیز از مهم‌ترین روش‌های استفاده بهینه از منابع آب و خاک به‌شمار می‌آید. در کشور ما اکثر حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه حوضه‌های آبخیز کوهستانی، فاقد ایستگاه‌های هیدرومتری به تعداد کافی‌اند؛ و همین امر هرگونه برنامه‌ریزی عمرانی و مدیریتی را با مشکل مواجه می‌سازد. برای حل این مشکل، متخصصان علم آبخیزداری، هیدرولوژیست‌ها و محققان منابع آب راه‌حل‌های مختلفی را مانند فرمول‌های تجربی و مدل‌های ریاضی و کامپیوتری عرضه کرده‌اند که تا کنون هیچ یک نتوانسته است به نتیجه‌ای کاملاً مطلوب رهنمون شود. عقیده بر این است که شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژی در حوضه‌های آبخیز می‌تواند راه‌حل بهینه‌ای برای آنها باشد (Rostamian et al., 2009). ایده کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی برای فهم بهتر چرخه آب در محیط، و به‌ویژه پیش‌بینی رواناب به چهار دهه گذشته برمی‌گردد. در سال‌های اخیر هیدرولوژیست‌ها به‌منظور شبیه‌سازی کارای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز روی مدل‌های موجود یا ایجاد مدل‌های جدید کار کرده‌اند. چنانچه قابلیت‌ها و کارایی این مدل‌ها برای مناطقی با شرایط متنوع و متفاوت خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و جز اینها مورد تأیید قرار گیرد، می‌توان از این مدل‌ها به عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آب و خاک در حوضه آبخیز استفاده کرد (Guzha et al., 2010).

اما از طرفی هم مدل‌های مذکور نیاز به برخی پردازش‌های عددی مانند کالیبراسیون پارامتر و تجزیه تحلیل حساسیت دارند تا به‌خوبی به‌کار روند. مدل‌ها هر قدر هم پیچیده باشند، به هر حال در نهایت همان ساده‌شده واقعیت زمینی‌اند و اصولاً فرضیات و الگوریتم‌ها، کیفیت و نوع داده‌های ورودی و تخمین پارامترهایی در آنها گنجانده شده است. بنابراین قبل از به‌کار بردن مدل برای هدف خاص، به واسنجی مدل بر اساس داده‌های مشاهده‌ای نیاز است. تخمین پارامتر به معنی مشخص کردن این است که: کدام پارامتر و اینکه

تا چه حدی باید واسنجی شود. روش‌های تخمین پارامتر عبارت‌اند از روش دستی<sup>۱</sup> و روش خودکار. روش دستی بسیار وقت‌گیر است و موفق بودن آن بستگی زیادی به تجربیات کاربر درباره مدل و حوضه آبخیز مورد مطالعه دارد؛ در صورتی که در روش خودکار الگوریتم در فضای پارامتر به جست‌وجو می‌پردازد تا بهترین مجموعه پارامترها را بیابد (Rouhani et al., 2010). کالیبراسیون خودکار نیازمند انتخاب تابع هدف مناسب، الگوریتم جست‌وجو و نیز معیاری برای به اتمام رساندن الگوریتم است. بدیهی است در موضوعات مرتبط با منابع آب، باید پارامترهای مختلف دخیل در فرایندهای هیدرولوژیکی اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل شوند و چون این فرایندها در سطح حوضه‌های کوچک منفرد رخ می‌دهند، پس تجزیه و تحلیل آنها نیز باید در مقیاس حوضه‌ای انجام گیرد. البته انجام چنین تحلیل‌هایی، نیاز دارد که تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای مؤثر و همچنین تأثیر آنها بر فرایند هیدرولوژیکی به دقت بررسی شود. رسیدن به این هدف، مستلزم مدل حوضه‌ای مناسب است. بیلان آب هر حوضه تحت تأثیر عواملی چون اقلیم و خصوصیات فیزیکی حوضه - همچون توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک - است. فهم و درک ارتباط بین عوامل فیزیکی و مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، اهمیت فراوانی در فرایند شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی دارد.

ارزیابی قابلیت‌ها و کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی برای مناطقی با شرایط متنوع خاک و توپوگرافی با کاربری اراضی و جز اینها در مقیاس‌های مکانی متفاوت به‌منظور استفاده از این مدل‌ها به‌عنوان ابزارهایی برای مدیریت منابع آب، امری لازم و ضروری است (Guzha et al., 2010). در نیم قرن گذشته تعداد زیادی از مدل‌های هیدرولوژیکی با ماهیت‌ها و پیچیدگی‌های مختلف برای اهداف گوناگون شکل گرفتند و آزمایش شدند و نتایج آنها نیز ارائه گردید.

### 1. Manual

زیرزمینی بر رفتار هیدرولوژیک حوضه گادپانا در اسپانیا استفاده شد. تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف نشان داد که SWAT مدلی مناسب برای تصمیم‌سازی در خصوص کشت گونه‌های مختلف گیاهی است، اما این مدل نمی‌تواند با دقت خیلی زیاد رفتار سفره آب زیرزمینی را بر اساس تغییرات کاربری اراضی شبیه‌سازی کند. الانسی و همکاران در سال ۲۰۰۹ از مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب و بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب در بالادست حوضه بر نام در کشور مالزی استفاده کردند؛ و به‌منظور ارزیابی مدل شبیه‌سازی شده نیز ضریب  $R^2$  و ضریب تأثیر ناش ساتکلیم به کار رفت. نتایج تحقیق حاکی از قابلیت بالای مدل SWAT در شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان رواناب در شرایط مرطوب گرمسیری است. حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۰ تحقیقی با عنوان واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در منطقه طالقان انجام دادند. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی سالانه مشخص ساخت که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی دارای همبستگی بیشتر و خطای کمتری در قیاس با دوره‌های زمانی ماهانه و روزانه است و مقادیر آنها با احتمال ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری را نشان نمی‌دهد. هدف‌های این تحقیق عبارت‌اند از:

- (۱) شناخت حساس‌ترین پارامترهای مدل با استفاده از یکی از روش‌های پیشرفته آنالیز حساسیت جهانی؛ و
- (۲) بررسی قابلیت شبیه‌سازی رواناب و ارزیابی مدل SWAT در حوضه کوهستانی طالقان در محل ایستگاه هیدرومتری گلینک.

بعد از آماده‌سازی داده‌ها، پیاده‌سازی مدل انجام شد. پس از تحلیل حساسیت و تعیین پارامترهای حساس و مهم‌تر، واسنجی<sup>۱</sup> و اعتبارسنجی مدل صورت پذیرفت؛ و سپس مدل به صورت کیفی و کمی مورد ارزیابی قرار گرفت.

در این تحقیق کاربرد مدل SWAT در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبخیز طالقان مورد بررسی قرار گرفته است. مدل SWAT مدلی یکپارچه و نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی در مقیاس حوضه‌ای است که دپارتمان کشاورزی ایالت‌های متحد آمریکا آن را به وجود آورده است. رستمیان و همکاران در سال ۲۰۰۹ از مدل SWAT برای تخمین رواناب و رسوب حوضه بهشت‌آباد استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که SWAT در مجموع، دبی رواناب را بهتر از غلظت رسوب شبیه‌سازی می‌کند. آنان علت‌های ضعف مدل در شبیه‌سازی رواناب را، ضعف شبیه‌سازی ذوب برف، فرضیات مدل در انتقال جریان، و تعداد کم داده‌ها برشمردند؛ و کاستی‌های مدل را در شبیه‌سازی غلظت رسوب در واقع در شبیه‌سازی ضعیف جریان، تعداد اندک داده‌ها و همچنین عدم پیوستگی اطلاعات رسوب دانستند. یعقوبی و همکاران در سال ۲۰۱۰ مدل توزیعی WetSpa را برای تهیه نقشه ضریب پتانسیل رواناب به‌منظور شناسایی و اولویت‌بندی مناطق سیل‌خیز در حوزه آبخیز چهل‌چای به کار بردند. روحانی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل بارندگی - رواناب IHACRES که اساس آن از دو مدل غیرخطی افت و مدل خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود، شبیه‌سازی سری‌های زمانی پیوسته دبی را در زیرحوضه وطن‌واقع در حوزه آبخیز گرگانرود انجام دادند. گوژا و هاردی در سال ۲۰۱۰ کارایی مدل TOPNET را که از مدل‌های توزیعی هیدرولوژیک است، برای مدل‌سازی رواناب در حوضه‌ای از ایالت اوهایو آمریکا بررسی کردند؛ و برای ارزیابی مدل از مقادیر بصری و تکنیک‌های آماری استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل TOPNET دارای قابلیت زیادی در شبیه‌سازی رواناب است. از مشکلات این مطالعه، می‌توان مدل‌سازی نکردن ذوب برف را برشمرد.

کونان و همکاران در سال ۲۰۰۳ تأثیر فعالیت‌های انسانی را در تبدیل زمین‌های مرطوب به زمین‌های خشک مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از مدل SWAT برای بررسی تأثیرات کاهش سطح آب

## 1. Calibration

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز طالقان از زیرحوضه‌های مهم آبخیز سفیدرود به‌شمار می‌رود و در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال غربی تهران واقع است. این منطقه در میان دره بزرگی در کوه‌های البرز قرار دارد. طالقان از سه بخش تشکیل شده است: پایین طالقان، میان طالقان، و بالا طالقان؛ و در مجموع دربردارنده حدود ۸۰ روستای کوهستانی است.

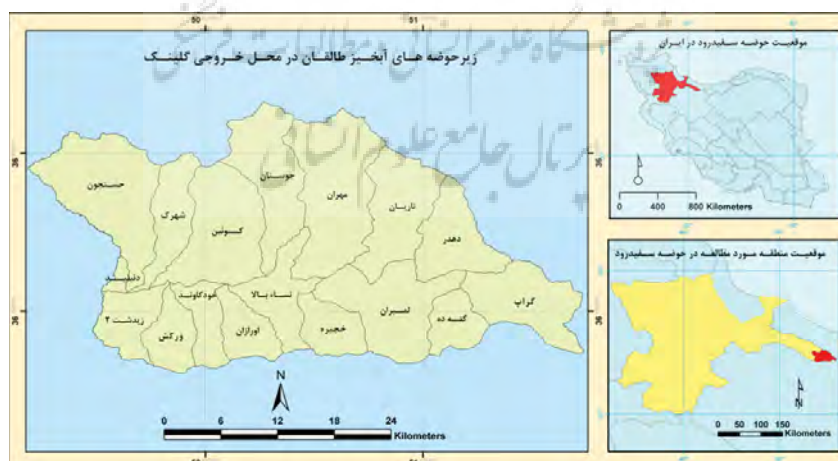
مساحت منطقه تا خروجی ایستگاه گلینک حدود ۸۲۰ کیلومتر مربع است. این حوضه بین طول شرقی  $50^{\circ}36'$  تا  $51^{\circ}10'$ ، و عرض شمالی  $36^{\circ}5'$  تا  $36^{\circ}21'$  واقع است؛ و از شمال به حوضه الموت و سرداب، از جنوب به کردان و زیاران، از شرق به حوضه کرج و چالوس، و از غرب به حوضه زیاران و الموت محدود می‌شود (شکل ۱).

رودخانه طالقان در مرکز این حوضه از گردنه عسلک در غرب کندوان سرچشمه می‌گیرد و به سمت غرب جریان دارد. این رودخانه پس از دریافت

شاخه‌های پرآبی مانند رودهای علی‌زان، مهران، خجیره، حسنجون، اورازان و جز اینها، طی چندین کیلومتر به رودخانه الموت می‌پیوندد و پس از آن با نام رودخانه شاهرود به دریاچه سد سفیدرود می‌ریزد. در مجموع منطقه‌ای کوهستانی با شیب‌های تند در اطراف طالقان رود قرار دارد. جهت جریان در شاخه اصلی رودخانه از شرق به غرب است و شاخه‌های فرعی آن در دامنه‌های شمالی و جنوب به سمت شاخه اصلی رودخانه جریان دارند. ارتفاع متوسط محدوده ۲۴۶۶ متر، شیب متوسط  $33/08$  درصد، متوسط بارش سالانه  $500$  میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالانه  $10/5$  درجه سانتی‌گراد، و اقلیم منطقه نیز براساس روش آمبرژه ارتفاعات سرد محاسبه گردید (Arzani et al., 2009).

### ۲-۲- مدل SWAT

مدل‌های توزیعی زیادی وجود دارند که به دو دسته کلی تجربی و فیزیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های تجربی در واقع مدل‌های جعبه سیاه‌اند و کوشش شده است که اینها ارتباط لازم را بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار سازند (Arnold et al., 1998).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

رواناب در روز  $E_a$ ، مقدار تبخیر و تعرق در روز  $W_{seep}$ ، مقدار آب نفوذی به لایه فوقانی خاک در روز  $Q_{gw}$ ، مقدار جریان برگشتی در روز  $Q_{gw}$  است (به تمامی برحسب میلی-متر).

در مدل SWAT، برای تخمین رواناب سطحی، دو روش وجود دارد: الف) روش شماره منحنی؛ و ب) رابطه نفوذ گرین - امپت (Neitsch et al., 2005). در این تحقیق مقدار رواناب براساس روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) - موسوم به روش منحنی SCS - بدین صورت محاسبه می‌شود:

رابطه (۲)

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

$Q_{swf}$ : مقدار رواناب در روز  $Q_{swf}$  برحسب میلی-متر،  $R_{day}$ : مقدار بارندگی در روز  $R_{day}$  برحسب میلی-متر، و  $S$ : پارامت نگهداشت آب در داخل حوضه است که بدین صورت محاسبه می‌شود:

رابطه (۳)

$$S = 2.5 / 4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

CN: پارامتر خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری در مدل SWAT هر حوضه در دو مرحله به زیرواحدهایی تقسیم می‌شود. در مرحله نخست، هر حوضه براساس توپوگرافی به چند زیرحوضه، و در مرحله بعدی به چند واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) تقسیم می‌گردد. این واحدها از لحاظ کاربری اراضی و خصوصیات خاک، همگن‌اند. برای هر واحد هیدرولوژیک، میزان آب و رسوب و چرخه عناصر و تلفات تعیین می‌شود و برای هر زیرحوضه نیز متوسط وزنی محاسبه می‌گردد. آن‌گاه پس از جمع شدن این مقادیر در مسیر شبکه رودخانه تا محل خروجی حوضه با یکدیگر، مقدار نهایی برای حوضه تعیین می‌شود (Ncube, 2006 & Neitsch et al., 2005).

در مدل‌های توزیعی، حوضه آبخیز به واحدهایی مجزا تقسیم می‌گردد و مقادیر مختلف پارامترهای فیزیکی به هر واحد اختصاص داده می‌شود (Guzha et al., 2010). از آنجا که در حوضه‌های آبخیز امکان اندازه‌گیری تمام کمیت‌های مورد نیاز برای بررسی عکس‌العمل حوزه میسر نیست، و تمام ورودی‌ها نیز در یک مدل اندازه‌گیری نمی‌شوند - یا این کار، شدنی نیست - انتخاب مدلی که بتواند در عین سادگی ساختار، با استفاده از حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز پیش‌بینی را با دقت مناسبی ارائه کند، و همچنین انجام کالیبراسیون، امری ضروری به نظر می‌رسد (Sharifi et al., 2003). در دهه اخیر مدل‌های فیزیکی توزیعی به دلیل انطباق‌شان با مشخصه‌ها یا خصوصیات نظری (تئوریک) حوضه، اهمیت بیشتری یافته‌اند (Hosseini et al., 2010). در این مطالعه مدل SWAT به این دلیل انتخاب شد که در تحقیقات زیادی - با اهداف مشابه تحقیق حاضر - به کار رفته‌اند؛ و پژوهشگران نیز قابلیت‌های آن را در شبیه‌سازی هیدرولوژیک تأیید کرده‌اند. SWAT مدل یکپارچه و پیچیده‌ای در مقیاس حوضه‌ای است که قابلیت آنالیز داده‌ها را در بازه‌های زمانی مختلف دارد: سالانه، ماهانه، روزانه و ساعتی. این مدل را دکتر جف آرنولد برای سرویس تحقیقات کشاورزی ایالت‌های متحد آمریکا، به منظور پیش‌بینی تأثیرات اعمال مدیریتی بر آب، رسوب و بیلان مواد شیمیایی کشاورزی در حوضه‌های بزرگ و پیچیده با انواع مختلف و نیز کاربری و شرایط مدیریتی متفاوت در دوره زمانی طولانی، ارائه کرد (Neitsch et al., 2005).

در مدل SWAT چرخه هیدرولوژی براساس معادله بیلان آب شبیه‌سازی می‌شود (Zhang et al., 2009):

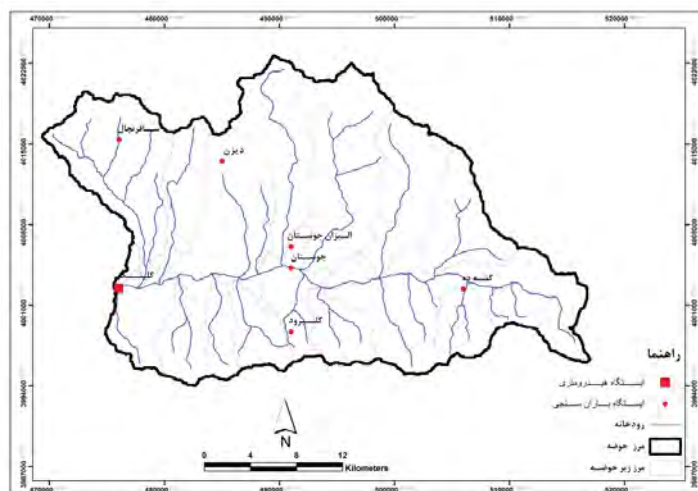
رابطه (۱)

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

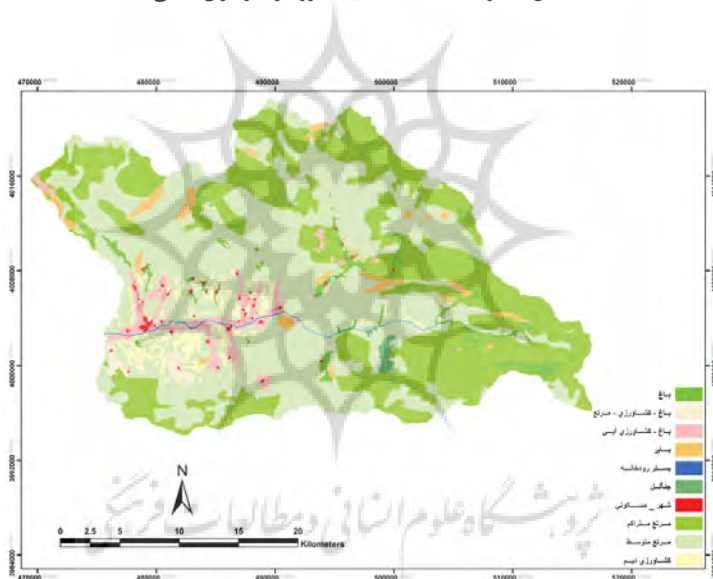
$SW_t$ : مقدار نهایی آب خاک،  $SW_0$ : مقدار اولیه آب خاک،  $R_{day}$ : مقدار بارندگی در روز  $Q_{surf}$ : مقدار

## 1. Hydrologic Response Unit

## مهران شایگان و همکاران



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی



شکل ۳. کلاس‌های کاربری طبق استاندارد مدل

داده‌های مختلف مکانی از نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری استخراج شدند. این داده‌ها شامل شبکه آبراه‌ها، مرز حوضه‌ها و کاربری اراضی بود که پردازش‌های لازم برای ورود به مدل بر روی آنها انجام گرفت. لایه خاک‌شناسی از لایه قابلیت اراضی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ و اطلاعات توصیفی مورد نیاز لایه خاک‌شناسی برای ورود به مدل از گزارش مطالعات

## ۲-۳- داده‌ها

در منطقه مورد مطالعه، ۵ ایستگاه با اندازه‌گیری دبی روزانه، و نیز ۵ ایستگاه باران‌سنجی استقرار یافته‌اند که از میان ایستگاه‌های هیدرومتری، ایستگاه گلینک در نقطه خروج حوضه به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل برای شبیه‌سازی دبی رواناب در نظر گرفته شد (شکل ۲).



حساسیت انجام گرفت. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه گلینک صورت پذیرفت، و بعد از واسنجی مدل نیز عمل اعتبارسنجی انجام گرفت. پس از آن، به ارزیابی مدل با استفاده از مقایسه بصری پلات‌های سری زمانی و شاخص‌های آماری پرداخته شد.

#### ۲-۴-۱- تحلیل حساسیت

اهمیت نسبی پارامترهای ورودی مدل با توجه به خروجی آن، به‌طور معمول با استفاده از تحلیل حساسیت ارزیابی می‌شود. یکی از چالش‌های مدل‌سازی حوضه آبخیز، شناسایی از طریق آنالیز این حساسیت است که چه پارامترها و ورودی‌هایی به شدت بر سیستم خروجی مربوط به آن، تأثیر می‌نهند. بیش از ۳۰ پارامتر در مدل SWAT برای شبیه‌سازی بارش - رواناب نقش دارند. قبل از کالیبراسیون مبتنی بر حدس و گمان با توجه به داده‌های در دسترس، داشتن درک درست از مشخصات حوضه آبریز و فرایندهای هیدرولوژیکی مورد نظر، اهمیت دارد (Rouhani و همکاران ۲۰۰۷). بنابراین کاهش تعداد پارامترها با حذف پارامترهای کم تأثیرتر ضروری است. به این منظور باید روش تحلیل حساسیت مناسبی را به کار برد؛ که بدین منظور در این تحقیق حساسیت مدل به پارامترهای مختلف با روش LH\_OAT<sup>۱</sup> سنجیده می‌شود. اساس LH\_OAT مانند روش مونت کارلوست، با این تفاوت که در این روش از نمونه‌برداری خوشه‌ای به جای نمونه‌برداری تصادفی استفاده می‌شود. مراحل اجرا نیز بدین صورت‌اند:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (۴) \text{ رابطه}$$

$X_1, X_2, \dots, X_n$ : متغیرهای مستقل،  $Y$ : متغیر وابسته  
مرحله یکم: محدوده هر متغیر به  $n$  فاصله  
غیرهم‌پوشان تقسیم می‌گردد و از هر بازه، مقداری انتخاب می‌شود.

1. Latin Hypercube One Factor At a Time

آبخیزداری حوضه طالقان - انجام شده در دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران - برگرفته شد (Ministry of Energy, 1993).

نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ETM+ سال ۲۰۰۲ تهیه شد؛ و تعداد کلاس‌های کاربری اراضی براساس نقشه موجود وزارت جهاد کشاورزی تعیین گردید. کلاس‌های مختلف کاربری اراضی (شکل ۳) شامل باغ، مراتع (متراکم، متوسط و ضعیف)، مخلوط باغ - کشاورزی آبی، مخلوط باغ - کشاورزی - مرتع، کشاورزی (دیم - آبی)، اراضی بایر، و بستر رودخانه؛ و کلاس‌های خاک‌شناسی منطقه نیز براساس استاندارد مدل SWAT طبقه‌بندی و کدگذاری شدند. همچنین گفتنی است که از DEM تهیه شده از داده‌های رادار، به عنوان لایه اتفافی با اندازه پیکسل ۸۵×۸۵ متر استفاده شد.

#### ۲-۴-۲- روش تحقیق

برای تنظیم پارامترهای مدل و تعیین وضعیت پایه، مدل SWAT در نرم‌افزار Arcview بر پایه نقشه کاربری سال ۱۳۸۱ اجرا گردید و مرز حوضه بر اساس نقطه خروجی واقع در ایستگاه هیدرومتری گلینک بسته شد. بارش کوهستانی یا کوه‌بارش، در مناطق مشخصی از دنیا که در آنها بارش و دما با افزایش ارتفاع مرتبط است، پدیده‌ای مهم به شمار می‌آید (Neitsch et al., 2004). از آنجا که حوضه طالقان منطقه‌ای کوهستانی است، برای در نظر گرفتن تأثیر کوه بر باران و دما، مدل رقومی ارتفاع به ۵ طبقه تقسیم شد تا برای هر طبقه ارتفاعی، میزان انباشت و نیز تصعید و ذوب برف به صورت جداگانه در هر زیرحوضه معین گردد.

پیاده‌سازی مدل بعد از آماده‌سازی داده‌های عدد (داده‌های آب و هواشناسی) و لایه‌های مکانی نظیر توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک‌شناسی، انجام شد. پیش از واسنجی مدل، به‌منظور تعیین پارامترهای مهم‌تر - یا به عبارتی مؤثرتر - در خروجی مدل و کمک به کاهش پارامترهای مرحله واسنجی، عمل تحلیل

## ۲-۴-۳- روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی

### مدل

در این تحقیق به منظور بررسی کیفی و کمی کارایی مدل، به مقایسه بصری پلات‌های سری زمانی و شاخص‌های آماری همچون شاخص کارایی مدل<sup>۲</sup> یا معیار ناش ساتکلیف<sup>۳</sup> (NS)، هم‌قواری یا ضریب تعیین معیار<sup>۴</sup> (R<sup>۲</sup>) و درصد تورش یا انحراف (PBIAS<sup>۴</sup>) پرداخته شد.

معادلات مربوط به شاخص‌های استفاده شده، در ادامه درج می‌گردند.

رابطه (۶)

$$E = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{mean})^2}$$

E: شاخص کارایی مدل

Q<sub>obs</sub> و Q<sub>sim</sub> و Q<sub>mean</sub> به ترتیب دبی عبارت‌اند از: مشاهده شده، دبی شبیه‌سازی شده، و میانگین دبی مشاهده‌ای.

مقدار E از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر است؛ و ۱ یعنی برآزش عالی، E > ۰/۷۵ یعنی نتایج شبیه‌سازی خوب، و بین ۰/۳۶-۰/۷۵ یعنی رضایت‌بخش و پذیرفتنی بودن نتایج (Kepner et al., 2008). شاخص کارایی نشان‌دهنده عملکرد نسبی مدل است (Guzha et al., 2010).

R<sup>۲</sup>: نشانگر واریانس تبیین شده به وسیله مجموعه متغیرهاست، که «ضریب تعیین» نام دارد

(Jahanbakhsh, 2003).

رابطه (۷)

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right) \left( \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \right)} \right]^2$$

1. Latin Hypercube Sample
2. Model Efficiency
3. Nash and Sutcliffe
4. Percent of Bias

مرحله دوم: مقادیر انتخاب شده از پارامتر X<sub>۱</sub> به صورت تصادفی با مقادیر X<sub>۲</sub> زوج می‌شود.

مرحله سوم: مقادیر n زوج از X<sub>۱</sub> و X<sub>۲</sub> به صورت تصادفی با n مقدار از X<sub>۳</sub> ترکیب می‌گردد تا n مقدار ۳ تایی تشکیل شود. این فرایند تا شکل‌گیری n ترکیب K تایی (LHS<sup>۱</sup>) ادامه می‌یابد. سپس براساس نمونه‌های تولید شده (LHS) و با استفاده از روش OAT، حساسیت تحلیل می‌گردد. حساسیت پارامترهای مدل با تغییر یک فاکتور در هر اجرا تعیین می‌شود، به طوری که تغییرات خروجی مدل را در هر اجرا، می‌توان به تغییر پارامتر ورودی نسبت داد. میزان حساسیت براساس شاخص حساسیت محاسبه می‌شود.

رابطه (۵)

$$I = \frac{(y_2 - y_1) / (y_1)}{(x_{i2} - x_{i1}) / x_{i1}}$$

I شاخص حساسیت است، و y<sub>۱</sub> و y<sub>۲</sub> به ترتیب خروجی‌های متناظر با x<sub>i1</sub> و x<sub>i2</sub> هستند. رتبه‌بندی تأثیر پارامترها به تغییرات خروجی به گونه‌ای است که پارامتری که به بیشترین تغییرات دامن می‌زند دارای رتبه ۱ می‌شود.

رتبه حساسیت را می‌توان بدین صورت طبقه‌بندی کرد (Van et al., 2006):

رتبه ۱: خیلی مهم؛ رتبه ۲ تا ۷: مهم؛ رتبه ۸ تا ۲۷: کمی مهم؛ و رتبه ۲۸: بی‌اهمیت.

## ۲-۴-۲- واسنجی و اعتبارسنجی

برای ارزیابی مدل، نتایج به دو دوره زمانی واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم‌بندی شدند. واسنجی مدل برای دوره زمانی ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۲، و اعتبارسنجی مدل براساس داده‌های مستقل برای دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در محل ایستگاه گلینک انجام گرفت.



اجرای اولیه مدل برای دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۶ انجام گرفت. مقایسه مقدار دبی شبیه‌سازی شده با دبی اندازه‌گیری شده در محل خروجی حوضه در شکل ۴ نشان داده شده است. برطبق این شکل، اگرچه روند کلی مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر مشاهده‌ای تبعیت می‌کند، اما به این دلیل که مدل، آب پایه را خیلی کمتر از حد واقعی تخمین می‌زند، و نیز شیف‌ت و بیش تخمین مدل در مقادیر اوج دبی، واسنجی پارامترهای مدل اجتناب‌ناپذیر است.

شکل ۵ همبستگی بین دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده را در محل ایستگاه گلینک برای دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۶ نشان می‌دهد.

بر طبق جدول ۱، اگرچه میانگین دبی مشاهده‌ای و قبل از شبیه‌سازی بسیار نزدیک به هم‌اند، اما همبستگی پایین (۳۶ درصد) و همچنین بررسی بصری سری زمانی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (شکل ۳) حاکی از آن است که مدل مورد بحث توانایی چندانی برای پیش‌بینی مقادیر دبی ماهانه در محل ایستگاه گلینک ندارد.

### ۳-۲- تحلیل حساسیت

با انجام تحلیل حساسیت، مشخص شد که پارامتر شماره منحنی (CN<sub>۲</sub>) مهم‌ترین فاکتور است؛ و پارامترهای ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک (SOL\_AWC)، پارامتر درجه حرارت ذوب برف (SMTMP)، و پارامتر جبران تبخیر از خاک (ESCO) به ترتیب در زمره مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کننده دبی جریان در حوضه طالقان‌اند. رتبه حساسیت پارامترهای مهم در این تحقیق، در جدول ۲ نشان داده شده است.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$O_i$  و  $P_i$  به ترتیب عبارت‌اند از مقادیر پیش‌بینی و مشاهده شده در زمان  $i$ .

برای مقایسه مقادیر حاصل از شبیه‌سازی مدل و مقادیر مشاهده‌ای می‌توان از ضریب رگرسیون  $R^2$  استفاده کرد. PBIAS در واقع تخمینی را از میزان انحراف مقادیر پیش‌بینی شده از مقادیر مشاهده‌ای به دست می‌دهد. مقادیر  $R^2$  نزدیک به یک و PBIAS نزدیک به صفر حاکی از عملکرد خوب مدل‌اند (Guzha et al., 2010). مقادیر PBIAS تا  $\pm 25\%$  رضایت‌بخش در نظر گرفته می‌شود (Van et al., 2005).

برای ارزیابی هم‌قواری یا یکسان بودن و نبودن میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده، آزمون  $t$  استیودنت در سطح ۹۵ درصد، بدین صورت به کار رفت:

$$H_0: \bar{P} = \bar{O} \\ H_1: \bar{P} \neq \bar{O} \quad \alpha = 0.05$$

$\bar{O}$  و  $\bar{P}$  به ترتیب میانگین مقادیر پیش‌بینی و مشاهده‌ای‌اند. در این آزمون در فرضیه  $H_0$  میانگین مقادیر دو جامعه پیش‌بینی و شبیه‌سازی شده برابر است، ولی در فرضیه  $H_1$  چنین نیست.

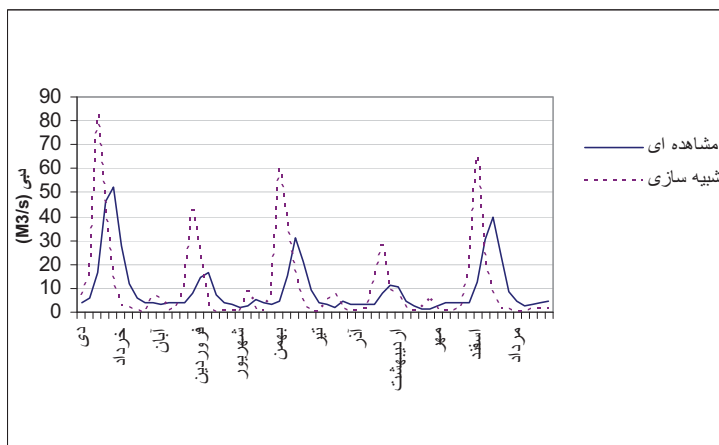
### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- پیاده‌سازی اولیه مدل

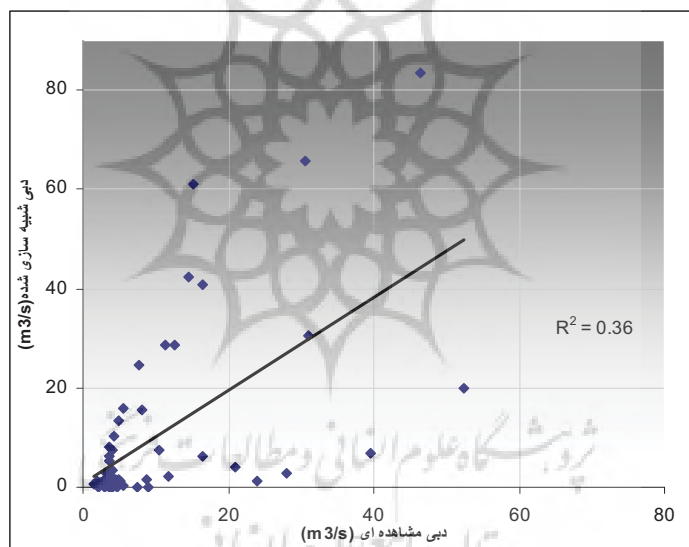
بهینه‌سازی به کار رفته در این تحقیق به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل SWAT براساس الگوریتم SCE<sup>۱</sup> بوده است. این روش از ادغام نقاط قوت روش‌های Nelder and Downhill Simplex Procedure Mead (1965) با مفاهیم جست‌وجوی تصادفی کنترل شده<sup>۲</sup>، تکامل رقابتی (Holland, 1975) و بر زدن مجموعه<sup>۳</sup> شکل گرفته و به وجود آمده است. (Duan et al., 1992).

1. Shuffled Complex Evolution
2. Controlled Random Search
3. Shuffled Complex

## مهران شایگان و همکاران



شکل ۴. دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی قبل از واسنجی



شکل ۵. همبستگی دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی قبل از کالیبراسیون

جدول ۱. خلاصه آماری دبی ماهانه قبل از واسنجی

|       |   |
|-------|---|
| ۹/۴۳  | میانگین دبی مشاهده شده<br>(متر مکعب بر ثانیه)       |
| ۱۰/۵۵ | میانگین دبی قبل از شبیه‌سازی<br>(متر مکعب بر ثانیه) |
| ۰/۳۶  | $R^2$   |

مدل سازی هیدرولوژیک حوضه طالقان در محیط GIS با استفاده از مدل SWAT

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت برای شبیه سازی بارش - رواناب، با استفاده از روش LH\_OAT

| پارامتر  | رتبه حساسیت | توصیف پارامتر                     |
|----------|-------------|-----------------------------------|
| CN2      | ۱           | شماره منحنی در شرایط رطوبتی نوع ۲ |
| SOL_AWC  | ۲           | ظرفیت آب در دسترس در لایه خاک     |
| SMTMP    | ۳           | درجه حرارت ذوب برف                |
| ESCO     | ۴           | فاکتور جبران تبخیر از خاک         |
| surlag   | ۵           | ضریب تأخیر جریان سطحی             |
| SMFMN    | ۶           | ضریب حداقل ذوب برف                |
| SMFMX    | ۷           | ضریب حداکثر ذوب برف               |
| ALPHA_BF | ۸           | فاکتور ضریب جریان پایه            |
| ch_n     | ۹           | ضریب مانینگ در کانال اصلی         |
| SOL_K    | ۱۰          | هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع |
| SFTMP    | ۱۱          | درجه حرارت ریزش برف               |
| GW_DELAY | ۱۲          | زمان تأخیر جریان زیرزمینی         |

جدول ۳. مقادیر اولیه، حداقل، حداکثر و بهینه در مرحله واسنجی مدل

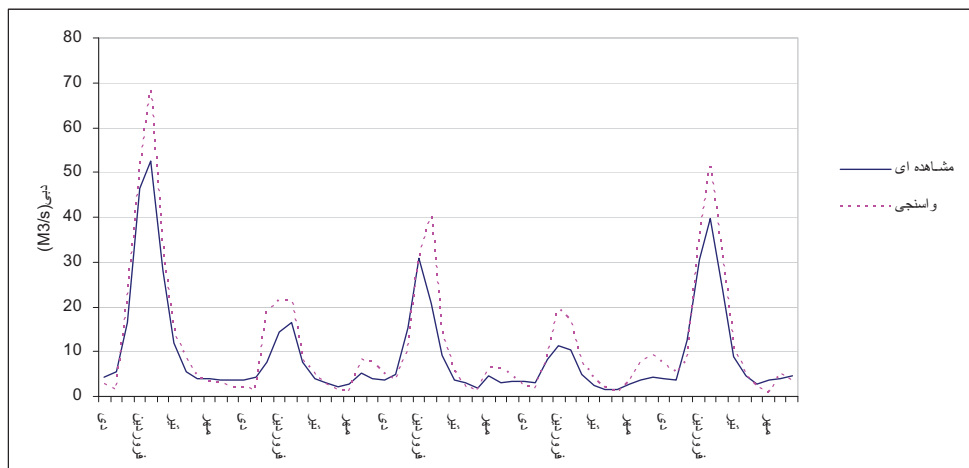
| پارامتر  | مقدار اولیه | حداقل  | حداکثر | مقدار بهینه |
|----------|-------------|--------|--------|-------------|
| CN2      | -           | -۱۰    | ۱۰     | ۱۰ ***      |
| SOL_AWC  | -           | -۵     | ۵      | -۵ **       |
| SMTMP    | ۰ / ۵       | -۳     | ۳      | ۱           |
| ESCO     | ۰ / ۹۵      | ۰ / ۵  | ۱      | ۰ / ۹       |
| surlag   | ۴           | ۰      | ۳      | ۰ / ۰۶      |
| SMFMN    | ۴ / ۵       | ۰      | ۶      | ۱ / ۴       |
| SMFMX    | ۴ / ۵       | ۰      | ۶      | ۴ / ۷       |
| ALPHA_BF | -           | ۰ / ۰۱ | ۰ / ۰۶ | ۰ / ۰۳۸     |

\* جایگزین مقادیر پارامتر \*\*\* ضرب در مقادیر پارامتر (درصد)

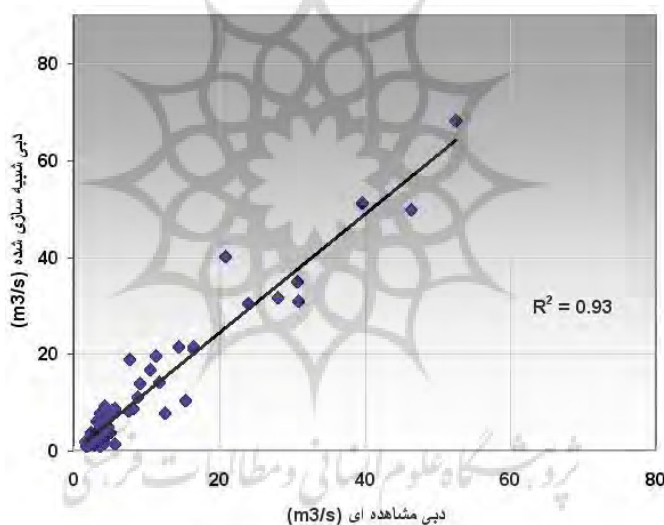
### ۳-۳- واسنجی

استفاده شد. گفتنی است که تعداد اجراهای مدل برای رسیدن به بهترین تابع هدف به ۵۰۰۰ اجرا محدود گردید. در جدول ۳ مقادیر اولیه، حداکثر، حداقل و بهینه در مرحله واسنجی در حوزه آبخیز طالقان با روش بهینه سازی الگوریتم SCE نشان داده شده است. شکل های ۶ و ۷ به ترتیب مقادیر ماهانه دبی اندازه گیری شده و شبیه سازی شده و نیز همبستگی بین دبی های مذکور را در دوره واسنجی نشان می دهند.

روش بهینه سازی الگوریتم SCE، تکنیک جست و جوی سودمندی برای واسنجی مدل های بارش - رواناب است. از آنجا که تخمین های بهینه انجام شده با روش های بهینه سازی محلی با انتخاب تصادفی نقاط آغاز می شوند، و نمونه برداری های تصادفی نقاط بر نتایج واسنجی تأثیر می نهند، برای غلبه بر آن از تکنیک های بهینه سازی سراسری (مانند روش الگوریتم SCE)،



شکل ۶. دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، بعد از کالیبراسیون



شکل ۷. همبستگی بین دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده در محل ایستگاه گلینک بعد از کالیبراسیون

شکل ۵ نیز این را تأیید می‌کند. شکل ۵ نشان می‌دهد که تخمین مدل در ماه‌های مرطوب بیشتر از میزان مشاهده‌ای است؛ و این بیش تخمین در مقادیر منفی PBIAS ملاحظه می‌شود.

همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، آزمون  $t$  برای مقایسه میانگین‌های مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به کار رفت (جدول ۵).

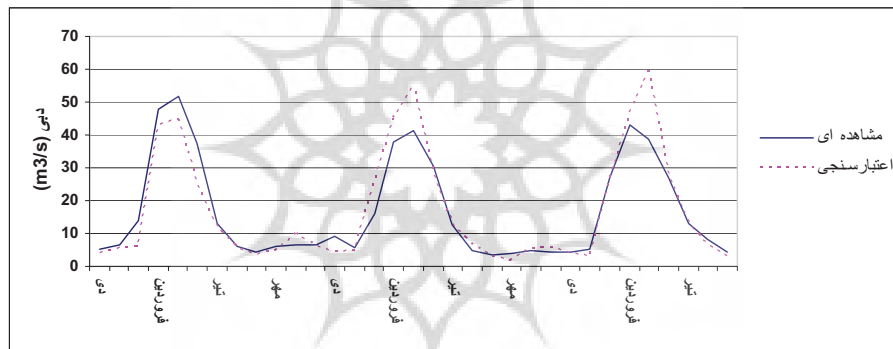
در جدول ۴ خلاصه آماری عملکرد مدل در بازه واسنجی نشان داده شده است. آماره‌های این جدول مشخص می‌سازند که این مدل به خوبی مقادیر دبی ماهانه را در محل ایستگاه گلینک پیش‌بینی می‌کند؛ و ضریب NS برابر ۰/۸ نیز مؤید این توانایی است. به‌علاوه، با توجه به اینکه مقدار PBIAS (-۱۳/۸) در محدوده رضایت‌بخش است، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج مدل خوب بوده‌اند. بررسی بصری سری زمانی در

جدول ۴. خلاصه آماری دبی ماهانه در فرایند واسنجی

| کالیبراسیون |   |
|-------------|---|
| ۹/۴۳        | میانگین دبی مشاهده شده (متر مکعب بر ثانیه)    |
| ۹/۸۹        | میانگین دبی شبیه سازی شده (متر مکعب بر ثانیه) |
| ۰/۸۰        | NS  |
| ۰/۹۳        | $R^2$   |
| -۱۳/۸       | PBIAS   |

جدول ۵. خلاصه نتایج آزمون t

| فاصله اطمینان اختلاف میانگین در سطح ۹۵ درصد |         |          |
|---|---------|----------|
| Sig   | حد بالا | حد پایین |
| ۰/۳۷۵                                       | ۲/۵۲    | -۶/۶۴    |



شکل ۸. دبی مشاهده ای و شبیه سازی در دوره زمانی اعتبارسنجی (۲۰۰۳-۲۰۰۵)

اندازه گیری شده و شبیه سازی شده و همچنین همبستگی بین دبی های مذکور را در دوره اعتبارسنجی نشان می دهد.

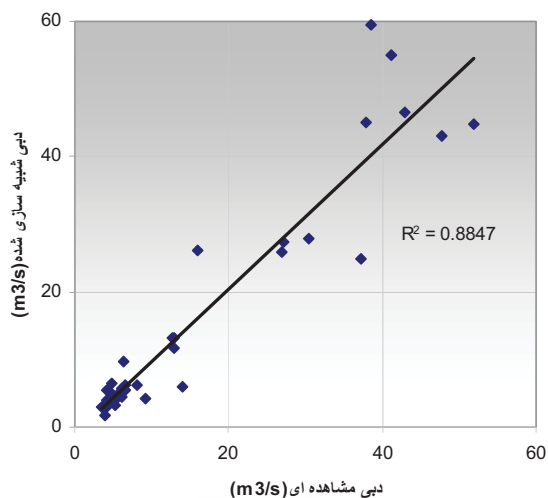
بررسی بصری مقادیر سری زمانی (شکل ۸) مشخص می سازد که توانایی مدل در شبیه سازی روند تغییرات دبی در بازه زمانی اعتبارسنجی، خیلی خوب است. شکل ۹ نیز نشان دهنده همبستگی مناسبی بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده است.

نتایج این آزمون حاکی از آن اند که چون  $Sig=0/375 > 0/05$ ، بدین ترتیب این با سطح اعتماد ۹۵ درصد، مشابه یکدیگرند و  $H_0$  تأیید می شود. به علاوه، همان گونه که در ستون های آخر همین جدول ملاحظه می شود، فاصله اطمینان برای اختلاف میانگین<sup>۱</sup> شامل صفر است که این خود هم قوارگی دو جامعه را تأیید می کند.

### ۳-۴- اعتبارسنجی

پس از بازه واسنجی مدل، به ارزیابی نتایج پرداخته شد. شکل های ۸ و ۹ به ترتیب مقادیر ماهانه دبی

1. Confidence Interval of the Difference



شکل ۹. همبستگی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره زمانی اعتبارسنجی

جدول ۶. خلاصه آماری دبی ماهانه در دوره زمانی اعتبارسنجی

| اعتبارسنجی | میانگین دبی مشاهده شده<br>(متر مکعب بر ثانیه)    |
|------------|--|
| ۱۶/۷       | ۱۶/۹   |
| ۱۶/۹       | میانگین دبی شبیه‌سازی شده<br>(متر مکعب بر ثانیه) |
| ۰/۸۴       | NS   |
| ۰/۸۸       | $R^2$  |
| -۲         | PBIAS  |

جدول ۷. خلاصه نتایج آزمون t در دوره اعتبارسنجی

| Sig   | فاصله اطمینان اختلاف میانگین در سطح ۹۵٪ | حد بالا | حد پایین |
|-------|---|---------|----------|
| ۰/۹۵۴ | ۷/۸۵                                    | -۸/۳۲   |          |

مدل واسنجی شده به خوبی مقادیر دبی ماهانه را در دوره اعتبارسنجی پیش‌بینی می‌کند. از ضریب برابر NS برای  $R^2$ ، ۰/۸۴ برابر  $R^2$  و مقدار PBIAS برابر -۲، می‌توان مناسب بودن نتایج مدل را دریافت. کاهش مقدار  $R^2$  می‌تواند ناشی از تأثیر داده‌های مشاهده‌ای بر مدل باشد.

بررسی بصری مقادیر سری زمانی (شکل ۸) مشخص می‌سازد که توانایی مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات دبی در بازه زمانی اعتبارسنجی، خیلی خوب است. شکل ۹ نیز نشان‌دهنده همبستگی مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. با بررسی آماره‌های جدول ۶ مشخص می‌شود که



در منطقه طالقان، تالسون و شومی کر در سال ۲۰۰۴ با استفاده از مدل SWAT انجام دادند، دبی اوج جریان کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین زده شد؛ اما در تحقیق حاضر، بزرگ‌ترین وقایع جریان بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین زده شد. دلیل آن را می‌توان چنین تشریح کرد که در تحقیق حاضر به‌منظور شبیه‌سازی دقیق‌تر ذوب برف، با تقسیم‌بندی مدل رقمی ارتفاع به ۵ باند، به تأثیر ارتفاع نیز بر بارش و دما توجه شده است. البته در تحقیق حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۰، از بین یازده پارامتر حساس تعیین شده، ۱۰ پارامتر با تحقیق حاضر یکسان‌اند؛ هر چند که رتبه حساسیت‌شان متفاوت است، و این که احتمالاً به دلیل دوره‌های زمانی مختلف این دو مطالعه بوده است. در مطالعه پیش‌گفته، دقت مدل در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، برای ضرایب NS و  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۵۸ و ۰/۷۹، و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۴ و ۰/۷۵ به دست آمد. در تحقیق حاضر، دقت مدل در مرحله واسنجی رواناب ماهانه، برای ضرایب NS و  $R^2$  به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۹۳، و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۴ و ۰/۸۸ به دست آمد. مقایسه نتایج دو تحقیق مشخص می‌سازد که در تحقیق حاضر، مدل با دقت نسبتاً بالاتری با شرایط منطقه واسنجی شده است.

تخمین زیاد دبی پیک مدل می‌تواند با چگونگی توزیع ایستگاه‌های باران‌سنجی و نحوه درون‌یابی بارندگی مرتبط باشد استلמן و همکاران نیز در سال ۲۰۰۱ به این نکته اشاره کردند.

پیشنهاد می‌شود که تحلیل حساسیت در سطح زیرحوضه‌ها انجام گیرد تا بتوان توزیع مکانی رتبه‌بندی حساسیت پارامترها و همچنین ارتباط آن را با پارامترهای ورودی نظیر کاربری اراضی و خاک - بررسی کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود که تحلیل بیشتری در زمینه پارامترهای ذوب برف صورت پذیرد، و مشخصاً تأثیر تعداد باندهای مختلف ارتفاعی نیز مورد بررسی قرار گیرد.

نتایج آزمون t (جدول ۷) حاکی از آن‌اند که چون  $H_0$ ، بنابراین با احتمال ۹۵ درصد،  $H_1$  رد می‌شود و  $H_0$  به اثبات می‌رسد. همچنین از آنجا که اختلاف میانگین در دو طرف صفر قرار دارند، هم‌فوارگی دو جامعه تأیید می‌شود و می‌توان مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر شبیه‌سازی شده آن دو را همسان دانست.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مدل‌های بارش - رواناب، ابزارهای مهمی در پروژه‌های منابع آبی به شمار می‌آیند. کارایی مدل‌های مذکور به انتخاب مناسب پارامترهای مدل بستگی دارد. در این مطالعه، به‌منظور واسنجی مدل بارش - رواناب SWAT با روش الگوریتم SCE، دبی ماهانه شش سال آبی در منطقه مورد مطالعه برای واسنجی، و دبی ماهانه سه سال آبی برای اعتبارسنجی به‌کار رفت. نتایج نشان دادند که این مدل توانایی کمتری در شبیه‌سازی دبی حد اوج دارد، چرا که مقادیر کمتری را برای این دبی‌ها در دوره واسنجی و اعتبارسنجی برآورد کرده است.

پیش از بهینه‌سازی پارامترهای مدل، با توجه به اینکه مدل مورد مطالعه در واقع مدلی نیمه‌توزیعی - فیزیکی است و تعداد زیادی پارامتر دارد، به‌منظور شناخت مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در حوزه آبخیز طالقان، به تحلیل حساسیت پرداخته شد. این تحلیل نشان داد که پارامترهای مربوط به ریزش و ذوب برف اهمیت زیادی دارند، و این خود با شرایط حوضه طالقان - که منطقه‌ای است کوهستانی - مطابقت می‌کند. از دیگر علل شبیه‌سازی نشدن دقیق رواناب در برخی از ماه‌های سال، می‌توان به این اشاره کرد که مدل SWAT نتوانسته است شبیه‌سازی ذوب برف را در حوضه طالقان به خوبی انجام دهد. رستمیان و همکاران در سال ۲۰۰۹ در مطالعه‌ای در حوضه کارون شمالی با استفاده از مدل SWAT به این موضوع اشاره کردند؛ و به هر حال بررسی بیشتر در این زمینه می‌تواند نتایج بهتری را به دست دهد.

در تحقیقی که حسینی و همکاران در سال ۲۰۱۰

- Modeling of the Upper Guadiana River Basin (Spain)**, Physics and Chemistry of the Earth 28, 193-200.
- Duan Q., Sorooshian S., Gupta VK., 1992., **Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-runoff Models**, Water Resources Research, 28(4): 1015-1031.
- Guzha A.C., Hardy T.B., 2010, **Application of the Distributed Hydrological Model, TOPNET, to the big darby Creek watershed, Ohio, USA**, Water Resour Manage, 24: 979-1003.
- Holland J., 1975, **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, University of Michigan Press: Ann Arbor, MI.
- Hosseini M., Ghafoori S.M., Sovm M.A., Ghazali A., Mohammadsharif A., 2010, **Calibration and Validation of SWAT Model in Taleghan Watershed**, 6th national conference on watershed science and engineering and 4th national conference on erosion and sediment, Tarbiat Modarres University.
- Jahanbakhsh E., 2003, **Learning to Use Statistical Tests in Social Research Usin, SPSS**, Danesh Pazhoohan Barin Institution Center (persian).
- Kepner W.G., Hernandez M., Semmens D.J., Goodrich D.C., 2008, **The Use of Scenario Analysis to Assess Future Landscape Change on Watershed Condition in the Pacific Northwest (USA)**, Use of Landscape Sciences for the Assessment of Environmental Security, 237-261.
- در مجموع، مقادیر حاصل از شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی نشان از آن دارند که مدل مذکور قابلیت زیادی برای پیش‌بینی دبی ماهانه حوضه طالقان دارد. به‌علاوه، شباهت زیاد منحنی‌های سری زمانی مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیز توانایی زیاد مدل را در پیش‌بینی دبی تأیید می‌کند. با انجام این تحقیق، بستری مناسب برای بررسی میزان رواناب در منطقه طالقان بر اساس شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه مورد نظر فراهم گردید. از این مدل هیدرولوژیک شبیه‌سازی شده می‌توان به عنوان مبنایی برای تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌های مختلف مدیریتی - نظیر تغییرات کاربری اراضی و تأثیرات هیدرولوژیک آن - استفاده کرد.
- ۵- منابع**
- Alansi A.W., Amin M.S.M., Abdul Halim G., Shafri 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, 6: 7581-7609.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998, **Large Area Hydrological Modeling Assessment**, Journal of the American Water Resources Association 34 (1).
- Arzani H., MirAkhoorlou KH., Hosseini S.Z., 2009, **Land Use Mapping Using The Landsat 7 (ETM+) Data (part of the ranges of the Taleghen Basin**, Iranian Journal of Rang and Desert Research, Vol. 16, 2: 150-160.
- Conan C., Marsilly G. D., Bouraoui F., Bidoglio G., 2003, **A Long-term Hydrological**

- Ministry of Energy, Regional Water Organization, 1993, **Taleghan Basin Watershed Studies**, vol 4, resource assessment and land capability.
- Ncube M., 2006, **The Impact of Land Cover and Land Use on the Hydrologic Response in The OLIFANTS**, M.Sc. Thesis, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand.
- Nelder JA, Mead R., 1965, **A Simplex Method for Function Minimization**, Computing Journal 7: 308-313.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W., 2005, **SWAT Theoretical Documentation Version 2005**, Soil and Water Research Laboratory, ARS, Temple Texas, USA.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan J.R., Williams J.R., 2004, **Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation**, version 2005, USA.
- Rostamian R., Mousavi S.F., Heydarpour M., Afiani M., Abbaspour K., 2009, **Application of SWAT 2000 Model for Estimating Runoff and Sediment in Beheshtabad Watershed, a Sub-basin of Northern Karun**, Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, 46: 517-531 (persian).
- Rouhani, H., Rahimi N.A., Ebrahimi H., 2010, **Capability of Semi-conceptual Model in Simulating of Rainfall-Runoff in Mountain-Forestry Catchment**, 6th national conference on watershed science and engineering and 4th national conference on erosion and sediment, Tarbiat Modarres University (persian).
- Rouhani, H., Willems, P., Feyen, J., 2007, **Analysis of Parameter Sensitivity and Uncertainty of the SWAT Hydrological Model**, Hydrological Science and Technology, 23: 191-2002.
- Sharifi F., Safarpour S., Ayubzadeh S.A., 2003, **Evaluation of AWBM 2002 Simulation Model in 6 Iranian Representative Catchments**, Research and development, 63: 35-42 (persian).
- Stellman K., Fuelberg H., Garza R., Mullusky M., 2001, **An Examination of Radar and Rain Gauge Derived Mean Areal Precipitation over Georgia Watersheds**, Weather Forecast 16:133-144.
- Tolson, B.A., Shoemaker C.A., 2004, **Watershed Modeling of the Cannonsville Basin Using SWAT2000: Model Development, Calibration and Validation for the Prediction of Flow, Sediment and Phosphorus Transport to the Cannonsville Reservoir**, Technical Report, School of Civil Environmental Engineering, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.
- Van Griensven A., Meixner T., Grunwald S., Bishop T, Diluzio M., Srinivasan R., 2006, **A Global Sensitivity Analysis Tool for the Parameters of Multi-variable Catchment Models**, J Hydrol 324: 10-23.

Van L., Arnold M., Bosch D., 2005, **Problem and Potential of Auto Calibrating a Hydrologic Model**, Trans Am Soc Agric Eng 48(3):1025-1040.

Yaghoobi F., Bahrehmand A., Noora N., 2010, **Map Production of Potential Runoff Coefficient Using WetSpa in Chehelchai Catchment**, 6th national conference on watershed science and engineering and 4th national conference on erosion and sediment, Tarbiat Modarres University. (persian).

Zhang X., Srinivasan R., Bosch D., 2009, **Calibration and Uncertainty Analysis of SWAT Model Using Genetic Algorithms and Bayesian Model Averaging**, Journal of hydrology 374: 307-317.

