جغرافیا و روابط انسانی، زمستان ۱٤۰۱، دوره۵، شماره۳، صص۲۲۱-۲۲۱

شبیه سازی بیلان هیدرولوژیک حوزه آبخیز رودخانه سمقان با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم SUFI۲

احسان زاهدی[۱]، علی طالبی[۲]، کامران داوری[۳]، وحید موسوی[٤]

۱-دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه یزد

۲-استاد دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد

۳-استاد گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

٤- استادیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

talebisf48@gmail.com

تاریخ دریافت:۱٤۰۰/۰٦/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۰۷/۰۲

چکیده

دلایل متعددی برای پاسخ به این سؤال که چرا باید فرآیندهای هیدرولوژیکی را مدل‌سازی نمود وجود دارد. پاسخ اصلی این سؤال، محدودیت روش‌های اندازه‌گیری در هیدرولوژی می‌باشد. در این تحقیق از مدل SWAT که مدلی مفهومی و نیمه توزیعی در مقیاس حوزه آبخیز می باشد برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوزه آبخیز سملقان استفاده شد. بعد از تهیه و آماده سازی داده ها طبق فرمت مورد نظر، مدل اجرا شد. پس از تحلیل حساسیت و تعیین پارامترهای مهم، واسنجی و اعتبارسنجی مدل صورت پذیرفت. به منظور کاهش عدم قطعیت، اجزای مختلف بیلان آب در واسنجی در نظر گرفته شد و از داده های مشاهداتی چندین ایستگاه اندازه گیری به طور هم زمان استفاده شد. در ادامه به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل از الگوریتم SUFI 2 استفاده شد. فرآیند واسنجی برای بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳و فرآیند اعتبارسنجی در بازه زمانی ۲۰۱٤ تا ۲۰۱۷ انجام شد. برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی از شاخص‌های R2 (ضریب تبیین۱)، bR2 (ضریب همبستگی وزنی)، NS (نش- ساتکلیف) استفاده گردید. در مرحله واسنجی ضرایب R2، bR2 و NS به ترتیب برابر ۰/۷٤، ۰/۷۱و ۰/٦۸ و در مرحله اعتبارسنجی برابر ۰/٦۹، ۰/٦۲ و ۰/۵۹ حاصل گردید. شاخص‌ها و نمودارهای بدست آمده در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی مدل برای شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه، نشان می‌دهد که مدل در مرحله واسنجی موفق‌تر عمل کرده است. همچنین مدل توانسته است زمان وقوع دبی اوج را به خوبی تعیین نماید. این تحقیق اطلاعات مفیدی را در مورد بیلان آبی حوضه رودخانه سملقان فراهم نموده و به برنامه ریزی دقیق تر منابع آب در این حوضه کمک می کند.

واژه های کلیدی: الگوریتم SUFI2، حوزه آبخیز سملقان، مدلسازی هیدرولوژیک، SWAT

[1] Coefficient of determination

شاپا الکترونیکی:3851-645

۱- مقدمه

برای بهینه سازی مصرف آب، اطلاع از بیلان آبی حوزه های آبخیز ضروری می باشد. از طرفی، اندازه گیری اجزای بیلان آب در فاصله های زمانی مورد نیاز به خاطر وقت گیر و پرهزینه بودن مشکل است .در کشور ما اکثر حوزه های آبخیز، به ویژه حوزه های آبخیز کوهستانی و صعب العبور، فاقد ایستگاه های اندازه گیری به تعداد کافی هستند که هر گونه برنامه ریزی مدیریتی را با معضل و یا حتی شکست مواجه می کند. برای مقابله با این معضل، متخصصان راه حل های مختلفی عرضه نموده اند. عقیده بر این است که مدل سازی پدیده های هیدرولوژی در حوزه های آبخیز می تواند راه حل بهینه ای برای آنها باشد (Rostamiyan, 2005)

در سال‌های اخیر هیدرولوژیست‌ها به منظور شبیه سازی کارایی هیدرولوژیک حوزه‌های آبخیز روی مدل‌های موجود یا ایجاد مدل‌های جدید کار کرده اند. چنانچه قابلیت و کارایی این مدل‌ها برای مناطقی با شرایط متنوع و متفاوت خاک، توپوگرافی، کاربری اراضی و جز اینها مورد تایید قرار گیرد، می توان از این مدل‌ها به عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آب و خاک در حوزه آبخیز استفاده کرد. دلایل متعددی برای پاسخ به این سؤال که چرا باید فرآیندهای هیدرولوژیکی بارش-رواناب را مدل‌سازی نمود وجود دارد. پاسخ اصلی این سؤال، محدودیت روش-های اندازه‌گیری در هیدرولوژی می‌باشد. در حقیقت، فرد قادر نیست هر چیزی راجع به سیستم‌های هیدرولوژیکی را که می‌خواهد بداند، اندازه‌گیری کند زیرا فقط تعداد محدودی از روش‌های اندازه‌گیری و همچنین دامنه‌ای محدود از اعداد در اختیار اوست. بنابراین به روشی احتیاج است تا به وسیله آن بتوان آمار موجود را برای حوزه‌های بدون آمار و یا مکان‌هایی که اندازه‌گیری در آن‌ها امکان‌پذیر نیست تعمیم داد و به تغییرات هیدرولوژیکی آینده دست پیدا کرد و این یک روش موثر برای توسعه علم است. یکی از مدل‌هایی که اخیرا در نقاط مختلف جهان به طور گسترده جهت شبیه سازی عوامل هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز، چه از نظر کمی و کیفی مورد استفاده قرار می گیرد مدل هیدرولوژیکی SWAT می باشد. مدل ارزیابی آب و خاک (Soil and Water Assessment Tool; SWAT) یک مدل جامع در مقیاس آبخیز می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده تهیه شده است. این مدل برای شبیه‌سازی حرکت آب، رسوب و آلاینده‌های شیمیایی کشاورزی در سطح حوزه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی طراحی شده است (Neitsch et al. 2015)، (Memarian et al. 2014).

درمطالعات زیادی از مدل SWAT جهت شبیه سازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز بهره گرفته شده است.

برای مثال Rahmati er al (2012) در تحقیقی به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر فرسایش و سیلخیزی حوضه سقزچای قبل و بعد از احداث سد شهید کاظمی با استفاده از مدل ArcSWAT پرداختند. در این پژوهش پس از پیش‌پردازش تصاویر ماهواره‌ای در نرم‌افزار ENVI نقشه‌های کاربری اراضی و NDVI تهیه و سپس داده‌ها

وارد وارد نرم‌افزار SWAT گردید و داده‌های لازم برای شبیه‌سازی آماده گردید و با استفاده از نرم افزار SWAT CUPنتایج صحت سنجی و واسنجی رسوب ضریب راندمان نش – ساتکلیف ۰/٦٤ و مقادیر این ضرایب به ترتیب ۰/۷٦ و ۰/٦۸ می–باشد و برای دبی دوره صحت سنجی راندمان نش – ساتکلیف ۰/٦۸ و مقادیر این ضرایب به ترتیب ۰/۸٦ و ۰/٦۷ بدست آمد که با توجه به میزان رسوب و دبی می‌توان گفت حوضه سیل‌خیز است.

Faramarzi et al (2014) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT در کنار SUFI2 برخی اجزای بیلان آب را در کل ایران شبیه‌سازی کردند. برای تعیین کارایی مدل، آنالیز عدم قطعیت انجام دادند. نتایج برای اکثر رودخانه های این کشور قابل قبول بود. Noori et al.(2019) در مطالعه ای به بررسی کارایی مدل SWAT در تعیین مؤلفه‌های بیلان آب حوزه حوزه آبخیز مهرگرد سمیرم پرداختند. فرآیند واسنجی برای بازه زمانی ۲۰۰٤ تا ۲۰۱۲ و فرآیند اعتبار سنجی برای بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱٦ انجام شد. دقت شبیه‌سازی رواناب ماهانه با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2) و نش ساتکلیف (NSE) برای فرآیند واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۷۳، ۰/٦۹ و ۰/۷۱، ۰/۵۸ مشاهده شد .

Rivas-Tabares (۲۰۱۹) در پژوهشی از مدل SWAT برای بررسی بیلان آب حوزه آبخیز Cega-Eresma-Adaja استفاده کردند .بررسی بیلان آب حوزه آبخیز ضریب نش -ساتکلیف برای دوره واسنجی 16 درصد و برای دوره اعتبارسنجی 67 درصد به دست آمد .نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بالای مدل در شبیه سازی شرایط هیدرولوژیکی حوزه های بزرگ مقیاس بخصوص مناطقی با شرایط نیمه خشک سرد میباشد. Mehrparvar et al. (۲۰۱۹) در پژوهشی با هدف شبیه سازی فرایند بارش -رواناب حوزه آبریز چالکرود از مدل SWAT استفاده کردند. به منظور به روزرسانی و اصلاح تولید منابع خطا، تکنیک داده گواری فیلتر کالمن مجموعه ای (EnKF) مورد استفاده قرار گرفت .نتایج بدست آمده حاکی از آن است که ضریب NS برای مدل اصلاحی معادل ۰/۸۲ ارتقاء یافته است. بر این اساس مدل SWAT عملکرد بهتری نسبت به مدل توسعه یافته بدون تکنیک EnKF از خود نشان داده است.

در این تحقیق برای شبیه سازی و مدلسازی هیدرولوژیکی حوزه آبخیز سملقان از مدل SWAT استفاده شد. بعد از تهیه و آماده سازی داده ها طبق فرمت مورد نظر، مدل اجرا شد. پس از تحلیل حساسیت و تعیین پارامترهای مهم، واسنجی و اعتبارسنجی مدل صورت پذیرفت. سپس نتایج به دو صورت کمی و کیفی مورد تحلیل قرار گرفت.

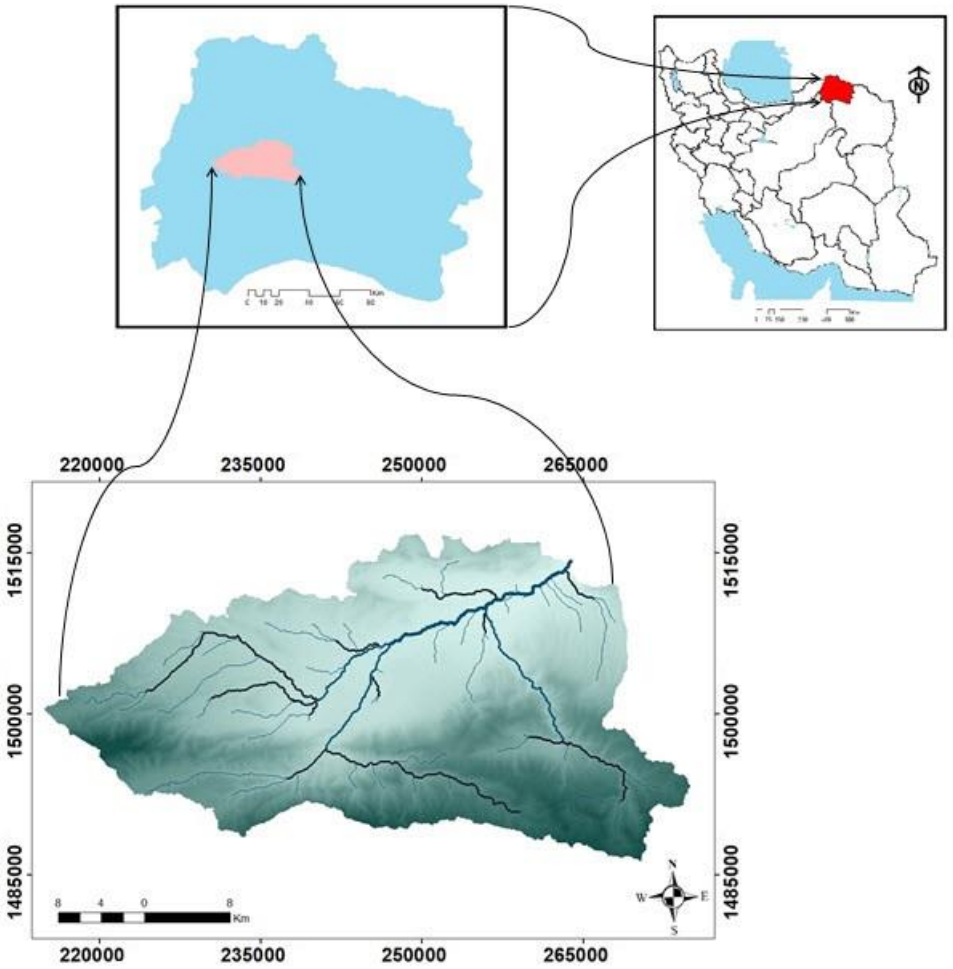
۲- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخیز سملقان یکی از دشت های حاصلخیز استان خراسان شمالی می باشد و از زیرحوزه های جنوبی رودخانه اترک است. شیب عمومی این دشت از طرف جنوب، غرب به شمال شرق می باشد و کاهش ارتفاع در جهت شمال

شرق باعث گردیده که شیب لازم جهت زهکش نمودن رواناب و سیلاب های حوزه را بوجود آورد. امتداد آبراهه های اصلی در ارتفاعات شمال، جنوب و غرب می باشد که باعث می شود رواناب و سیلاب های حوزه آبخیز سملقان را به سمت رودخانه اصلی دشت که دارای امتداد جنوب غرب- شمال شرق می باشد هدایت نماید. این منطقه به لحاظ شرایط خاص موروفولوژیکی و محیطی از یک طرف و هم جواری با ناحیه مرطوب هیرکانی از طرف دیگر، دارای تنوع خاصی می باشد. به طوری که میزان بارندگی آن از ۲۳۰ میلی متر در منطقه جیرانسو تا ۴۷۰ میلی متر در ارتفاعات سملقان و درکش متغییر بوده ودارای متوسط بارندگی ۳۱۸ میلی متر می باشد، همچنین دارای متوسط دمای هوای ۱۷ درجه سانتی گراد بوده و دارای اقلیم نیمه خشک است.

مطالعه منابع اب زیرزمینی این حوزه نیز از سال **1349** آغاز گردیده و کنترل تغییرات کمی و کیفی منابع آب و بررسی نوسانات سطح آب به طور مستمر ادامه دارد. تمرکز چاه های بهره برداری در دشت سملقان عمدتاً در دو ناحیه شمال شرقی و جوب غربی میباشد. بهره برداری از چاههای مزبور عمدتاً به منظور مصارف کشاورزی، بعضاً شرب و صنعت انجام میگیرد. سالیانه بیش از **64** میلیون متر مکعب از ذخائر آب زیرزمینی این حوزه توسط **118** حلقه چاه، **199** دهانه چشمه و **15** رشته قنات تخلیه میگردد.



شکل ۱: نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

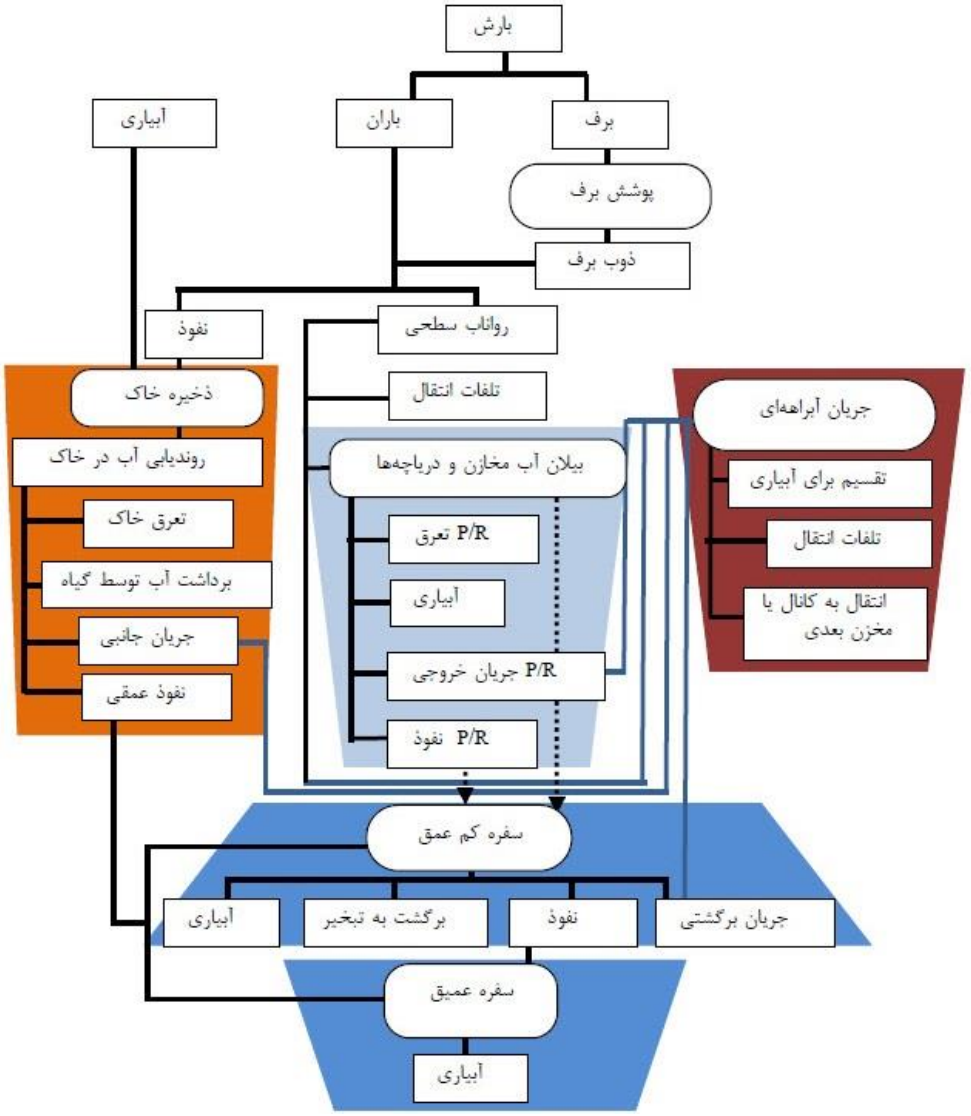
مدل SWAT

در این مطالعه جهت شبیه سازی بیلان آبی حوزه آبخیز سملقان از مدل ارزیابی آب و خاک(SWAT)**1** استفاده شده است. SWAT مدل جامع در مقیاس آبخیز می‌باشد که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده تهیه شده است. این مدل برای شبیه‌سازی حرکت آب، رسوب و آلاینده‌های شیمیایی-کشاورزی در سطح حوزه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی طراحی شده است (Neitsch et al. 2011).

این مدل دیدگاه مفیدی برای مدیریت سیستم‌های هیدرولوژیکی حوزه‌ها بر اساس آلترناتیوهای مختلف پوشش گیاهی ارائه می‌نماید. امروزه مدل SWAT جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و کاربری اراضی بر رژیم هیدرولوژیکی

[1] Soil and Water Assessment Tool

رودخانه‌ها و در تلفیق با مدل‌های چرخش عمومی جو بسیار مفید ارزیابی شده است. همانگونه که بیان شد مدل SWAT مدلی در مقیاس حوزه آبخیز بوده و شبیه سازی را در مقیاس روزانه انجام می‌دهد. ناهمگنی‌های مکانی در منطقه مورد مطالعه با تقسیم حوزه به زیرحوزه‌ها بررسی می‌شود. زیرحوزه‌ها به تعدادی واحدهای کوچکتر (واحدهای واکنش هیدرولوژیک، HRU) تقسیم می‌شوند، این واحدها دارای ترکیبات یکسانی از خاک، پستی و بلندی و کاربری اراضی می‌باشند. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، رشد گیاه، آفتکش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان است. اجزاء بیلان آب و مدیریت در سطح واحدهای واکنش هیدرولوژیک محاسبه و سپس برای زیرحوض ها میانگین گیری وزنی می‌شود .مدلSWAT برای داده‌های اقلیمی از نزدیک‌ترین ایستگاه به مرکز ثقل زیرحوزه استفاده می‌کند. روندیابی جریان توسط روش‌های ذخیره متغیر و ماسکینگام قابل محاسبه است. رواناب سطحی از بارندگی روزانه توسط روش شماره منحنی اصلاح شده محاسبه می‌شود (Arnold et al**, 1998**). این مدل نمونه ای از مدل‌های با مبنای فیزیکی است که بر اساس راه حل معادلات اساسی فیزیکی به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و مطالعه‌ی فرآیندهای سیستم اصلی می‌پردازد. اکثر روابط موجود در این مدل مبنای فیزیکی دارند و این نشان می‌دهد که تعداد متغیرهای لازم برای اجرای کامل و دقیق مدل زیاد است.



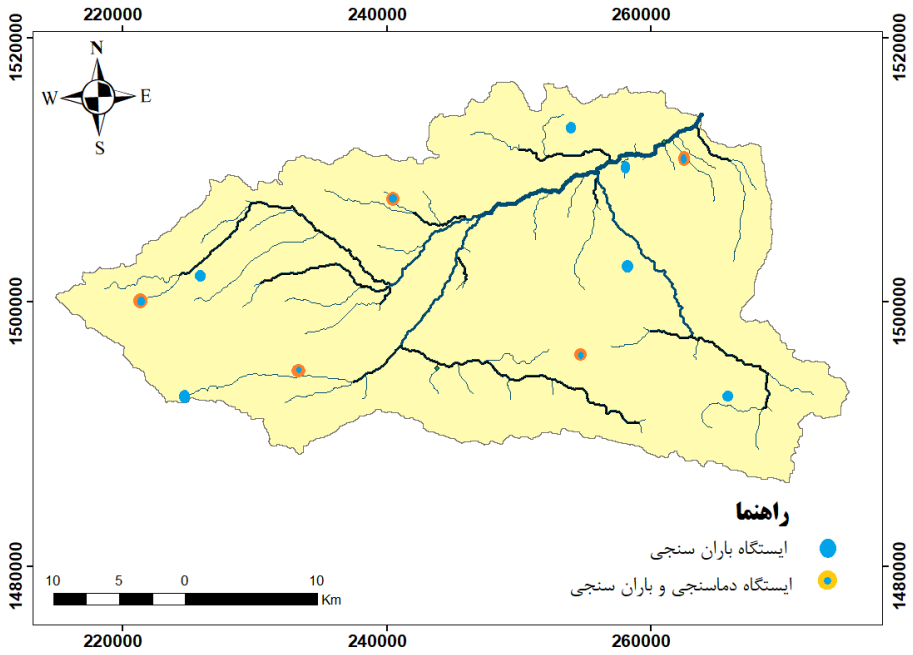
شکل ۲- ساختار کلّی چرخه هیدرولوژیک در حوضه آبخیز در مدل SWAT Akbari (2010)

معادله بیلان آب که در مدل استفاده می‌شود به صورت رابطه زیر می‌باشد (Neitsch et al., 2011) .

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

که در آن SW_t محتوای آب نهایی در خاک، **t** زمان (روز)، SW_0 مقدار آب اولیه موجود در خاک، R_{day}

مقدار بارش در هر روز، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در هر روز، E_a مقدار تبخیر و تعرق روزانه، W_{seep} مقدار آب نفوذ کرده به منطقه زیرقشری و Q_{gw} مقدار نفوذ به سفره زیرزمینی می‌باشد (Neitsch et al., 2005). در این مدل جریان رودخانه توسط سه منبع اصلی تأمین می‌گردد که عبارت‌اند از رواناب سطحی، جریان زیر سطحی و جریان پایه یا همان جریان آب زیرزمینی از سفره آب زیرزمینی غیر محصور. شکل ۳ محل قرارگیری ایستگاه‌های اقلیمی در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و شبکه آبراهه‌ای آبخیز سملقان.

واسنجی و اعتبارسنجی

مدل‌های هیدرولوژیک توزیعی باید یک فرایند موفق واسنجی را به همراه آنالیزهای حساسیت، عدم قطعیت و آنالیز پیشگویانه[1] طی کنند تا بتوان از آنها به عنوان ابزاری برای تصمیم‌سازی در مدیریت حوزه‌های آبخیز و مطالعه سناریوها استفاده کرد(Faramarzi et al., 2009) .. واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و یا با استفاده از روش‌های اتوکالیبراسیون امکان‌پذیر است. در تحقیق حاضر این مرحله به صورت اتوکالیبراسیون و با

Predictive analysis[1]

استفاده از برنامه SUFI2 و بر اساس آمار سالهای 2007 تا 2013 انجام شد (سال 2006 به عنوان دوره Warm-up در نظر گرفته شد). در ابتدا سعی شد مدل برای شبیه‌سازی در پایه زمانی سالانه واسنجی شود تا پس از دستیابی به نتیجه قابل قبول اقدام به واسنجی مدل برای پایه زمانی ماهانه شود. . با اجرای الگوریتم SUFI2 مقادیر بهینه پارامترهای حساس مدل تعیین می‌گردد. برای واسنجی مدل، این الگوریتم چندین بار اجرا می‌شود و در هر بار اجرا در صورت قابل قبول بودن نتایج بهینه‌سازی، از مقادیر بهینه پارامترها در مرحله اعتبارسنجی استفاده می‌شود. در صورت غیرقابل بودن نتایج، بهینه‌سازی مجدداً تکرار می‌شود.

اعتبارسنجی مدل عبارت است از فرایندی پس از واسنجی مدل که در آن قابلیت یک مدل انتخاب شده برای یک منطقه برای پیش‌بینی صحیح دوره‌ای غیر از دوره واسنجی بررسی می‌شود. زمانی می‌توان گفت یک مدل اعتبارسنجی شده است که صحت و قابلیت پیش‌بینی آن در دوره اعتبارسنجی با مقدار خطای قابل قبول اثبات شده باشد. لازم به ذکر است که عبارت اعتبارسنجی یک مدل به یک منطقه خاص اشاره دارد و نباید این تصور غلط به وجود آید که مدل برای تمامی نقاط اعتبارسنجی شده است. انجام مرحله اعتبارسنجی با استفاده از مقادیر پارامترهای اصلاح شده در مرحله واسنجی و بر اساس آمار سالهای ۸۲۰۰ تا 2013 صورت گرفت. نتیجه این بخش میزان اعتبار مدل واسنجی شده را نشان می‌دهد.

روش‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل

در این تحقیق برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌ها در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های R2 (ضریب تبیین[1])، bR2 (ضریب همبستگی وزنی)، NS (نش- ساتکلیف) استفاده گردید.

ضریب تبیین :

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(Simulated_i - Simaulated_{avg}\right)\left(Measured_i - Measured_{avg}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(Simulated_i - Simulated_{avg}\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(Measured_i - Measured_{avg}\right)^2} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن:

Simulatedavg = متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده

Measuredavg = متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است.

1 Coefficient of determination

ضریب bR2

اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و همچنین پویایی بین آن‌ها با استفاده از تابع bR2 نشان داده می‌شود. این تابع حاصل‌ضرب ضریب تبیین در ضریب رگرسیون می‌باشد. ضریب رگرسیون (b)، اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و ضریب تبیین (R^2)، پویایی بین آن‌ها را نشان می‌دهد.

ضریب ناش-ساتکلیف[1]

این روش ابزار دیگری است که اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Measured_i - Simulated_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[Measured_i - 1/n \sum_{i=1}^{n} Measured_i\right]^2} \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

راندمان NS به عنوان تابع هدف در هنگام واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مقدار ضریب ناش-ساتکلیف بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینه این شاخص یک است. لازم به توضیح است که عموماً اگر شاخص نش- ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل، و اگر بین ۰/۷۵ تا ۰/۳۶ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیرقابل قبول فرض می‌شود (Ndomba,۲۰۰۸) و (Zahedi, 2013). با توجه به زیاد بودن داده‌های ورودی، لازم است برای شناخت بهتر مدل و انجام موفق مرحله واسنجی، برای پارامترهای مدل آنالیز حساسیت انجام شود. هدف اصلی از آنالیز حساسیت تعیین ورودی‌هایی است که مشارکت بیشتری در تغییر خروجی دارند و اینکه کدام پارامتر همبستگی بیشتری با خروجی دارد (زاهدی، ۲۰۱۳) با استفاده از داده های دبی جریان متوسط ماهانه بین سال های 2007-2013، تحلیل حساسیت مدل انجام و تعداد ۱۴پارامتر با بیشترین حساسیت انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT بر شبیه سازی رواناب حوزه آبخیز درونگر.

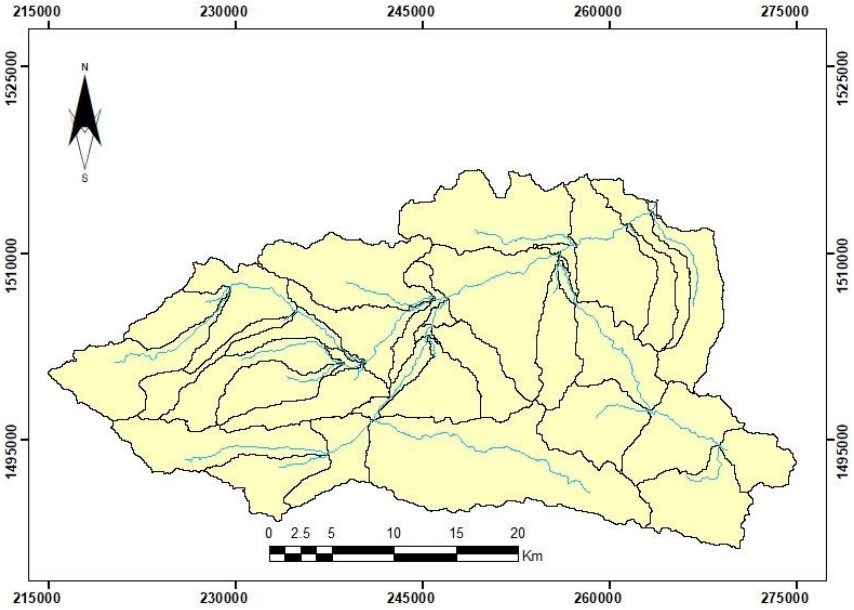
نام پارامتر	علامت اختصاری	ترتیب حساسیت	محدوده بهینه		مقدار بهینه
شماره منحنی	R__CN2.mgt	1	۱.325	۱.228	۱4.303
حداقل میزان ذوب برف در ۲۱ ژوئن	V__SMFMN.bsn	2	21.762	22.562	21.982
حداقل مقدار ذخیره آب برای رویداد جریان پایه	V__GWQMN.gw	3	1564.386	2035.558	1599.724
فاکتور جبران تبخیر خاک	V__EPCO.bsn	4	0.103	0.140	0.117
حداکثر میزان ذوب برف در ۲۱ دسامبر	V__SMFMX.bsn	5	11.138	13.591	13.407
آب نگه داشته شده توسط پوشش گیاهی	V__CANMX.hru	6	9.577	10.104	10.064
ضریب تأخیر رواناب	V__SURLAG.bsn	7	-5.507	-4.814	-5.420

[1] - Nash - Sutcliffe

گرادیان ارتفاعی بارش	V__TLAPS.sub	8	10.253	11.350	10.336
ثابت تخلیه آب زیرزمینی	V__ALPHA_BF.gw	9	1.412	1.465	1.435
ضریب α آب پایه برای ذخیره ساحلی کانال	V__ALPHA_BNK.rte	10	1.075	1.202	1.187
ضریب زبری کانال¬های فرعی	V__CH_N2.rte	11	0.000	0.002	0.002
آب قابل دسترس خاک	R__SOL_AWC(..).sol	12	0.981	1.000	0.989
هدایت هیدرو لیکی خاک	R__SOL_K(..).sol	13	0.334	0.454	0.373
ضریب آلبدوی خاک مرطوب	R__SOL_BD(..).sol	14	0.416	0.606	0.497

۳- یافته‌ها و بحث

همانطور که اشاره شد با اجرای مدل، متوسط پارامترهای هر زیر حوزه محاسبه می شود. محاسبه این پارامترها از دو جهت حائز اهمیت فراوان است، اولا با محاسبه این پارامترها از محاسبات تکراری در برخی مراحل کالیبراسیون مدل جلوگیری می شود و در نتیجه مدت زمان لازم برای اجرای مجدد مدل جهت بهینه سازی پارامترهای عمومی مدل به صورت قابل توجهی کاهش می یابد و ثانیا این خروجی‌های میانی در علم هیدرولوژی بسیار مهم هستند چرا که این خروجی ها به عنوان ورودی بسیاری از مدل های توزیعی و نیمه توزیعی در علم هیدرولوژی هستند و با اجرای مدل SWAT می توان این پارامترها را در هر حوزه محاسبه و در پروژه ها مورد استفاده قرار گیرند. بر اساس نتایج بدست آمده، حوزه مورد مطالعه دارای مساحت ۱۱۱۲۶۹ هکتار و ۳۷ زیر حوزه و ۲٤۱ واحد عکس‌العمل هیدرولوژیکی (HRU) می‌باشد که بزرگترین زیرحوزه دارای مساحت ۱۳۰۵٦ هکتار و تعداد ۱۲ واحد عکس‌العمل هیدرولوژیکی و کوچکترین زیرحوزه دارای مساحت ۹٤٤ هکتار و تعداد ٤ واحد عکس‌العمل هیدرولوژیکی می‌باشد.



شکل ٤- نقشه زیرحوزه ها با استفاده از مدل SWAT

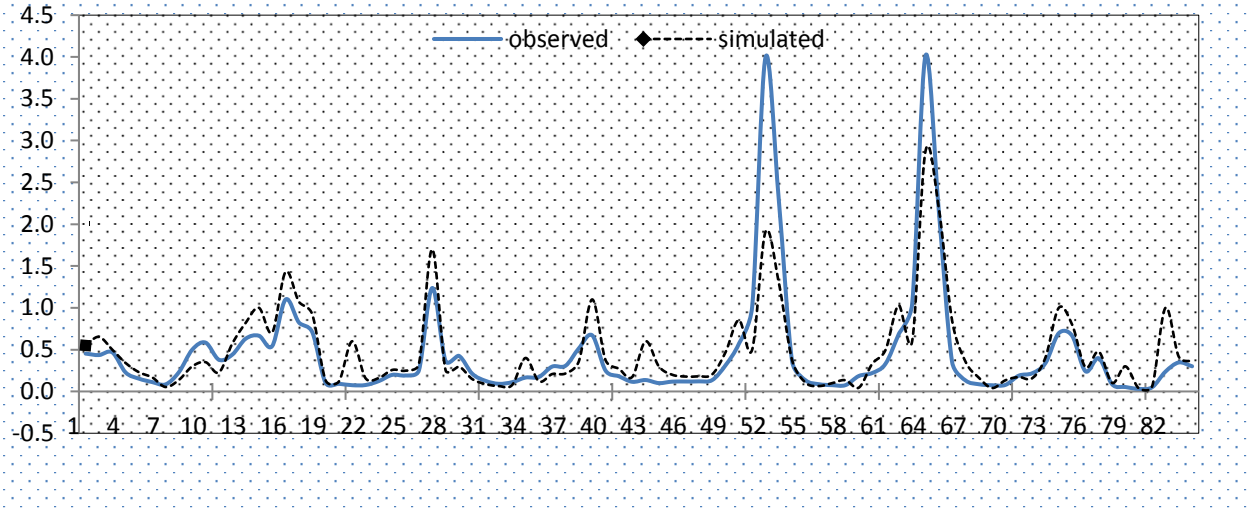
واسنجی مدل

واسنجی مدل SWAT به دو صورت دستی و همچنین استفاده از برنامه SUFI2 که در قالب نرم افزار SWAT_ CUP به مدل SWAT لینک شده است انجام گردید. جهت واسنجی مدل از آمار ۱۰ ساله اندازه گیری شده (۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳)، بارندگی، دما و دبی روزانه استفاده شد. در این مرحله به دفعات مختلف اقدام به اجرای مدل نموده و هر بار با توجه به شاخص ها و معیارهای آماری، نتایج را مورد ارزیابی قرار گرفت. مهمترین خطاهای نتایج اولیه عبارت بود از عدم هماهنگی نقاط اوج و شیب هیدروگراف‌ها و کم بودن حجم آب پایه. با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت مدل، پارامترهای موثر در این بخش‌ها شناسایی شده و در بهینه کردن مدل مورد استفاده قرار گرفت.

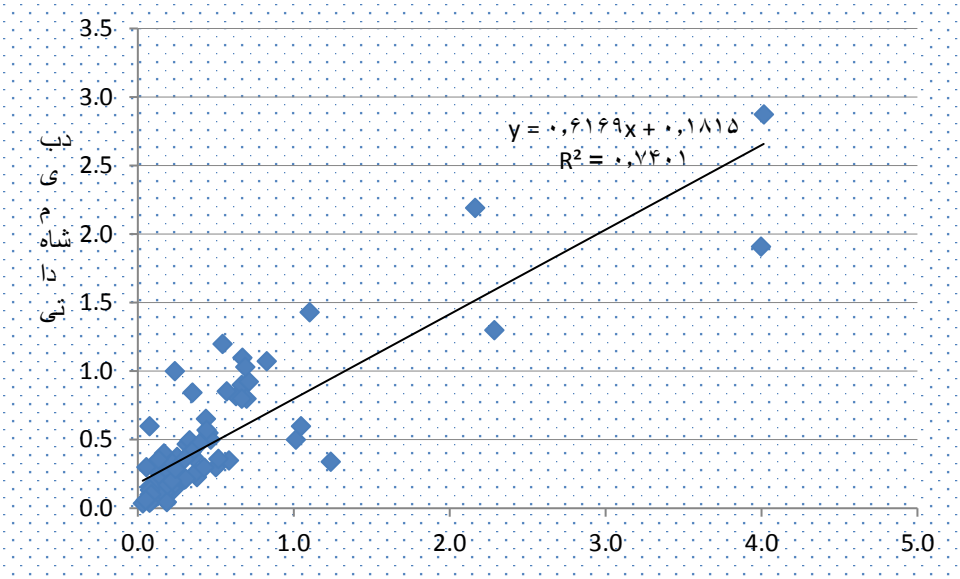
خلاصه نتایج در مرحله واسنجی به شرح جدول ۲ می باشد:

جدول ۲- ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی.

معیار ارزیابی	ضریب ناش-ساتکلیف	ضریب تبیین	ضریب تعیین وزنی
مشخصه	NS	R2	Br2
مقدار	۰/٦٨ (رضایت‌بخش)	۰/٧٤	۰/٧١



شکل ۵- مقایسه هیدروگراف های شبیه سازی شده و مشاهداتی در دوره واسنجی با پایه زمانی ماهانه.



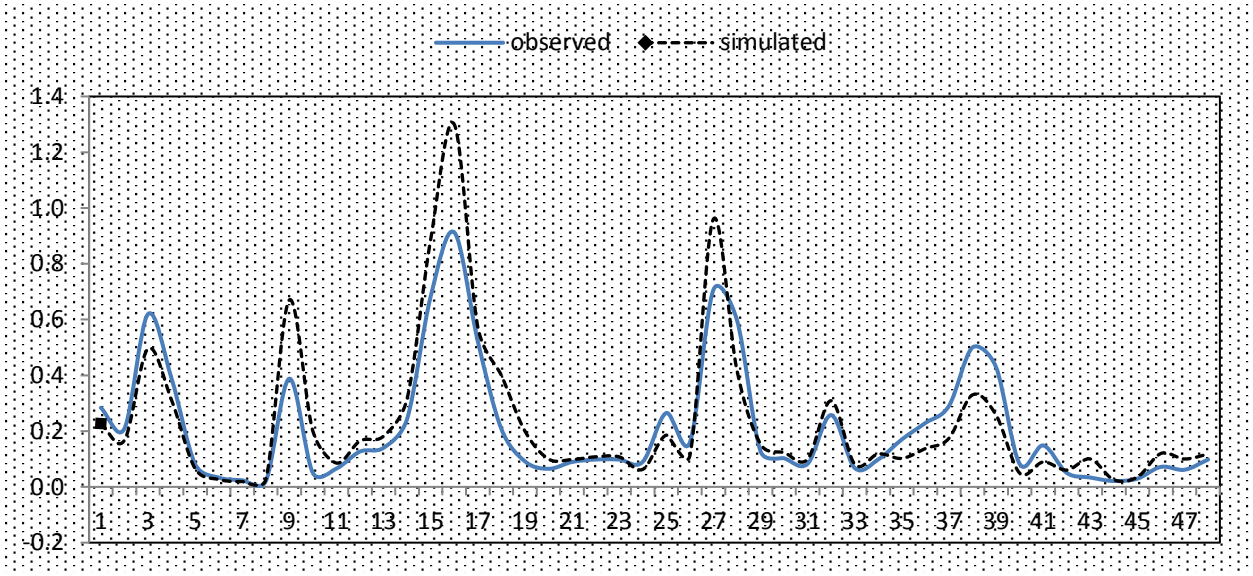
شکل ٦- نمودار همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده دوره واسنجی.

اعتبارسنجی مدل

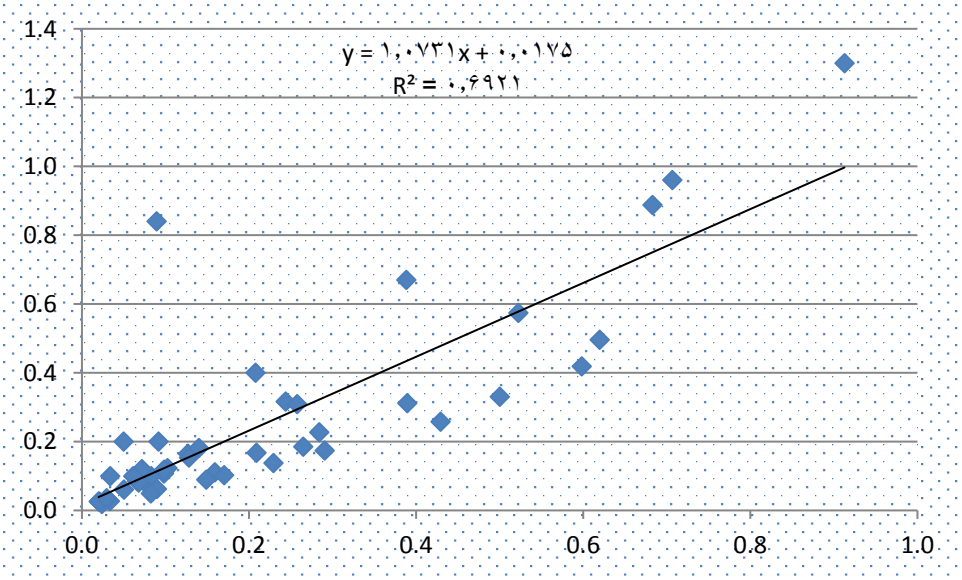
بعد از مرحله واسنجی مدل، به ارزیابی مدل پرداخته شد. ارزیابی مدل نیز نتایج قابل قبولی را در پی داشت. در این مرحله با توجه به پارامترهای کالیبراسیون بهینه شده برای منطقه مطالعاتی، با استفاده از باقی مانده آمار (۲۰۱۰-۲۰۰٦) اقدام به شبیه سازی جریان رودخانه شده و این نتایج به عنوان نتایج نهایی اعتبارسنجی مدل در ادامه ارائه شده است.

جدول ۳- ارزیابی نهایی کارایی مدل بعد از اعتبار سنجی.

معیار ارزیابی	ضریب ناش-ساتکلیف	ضریب تبیین	ضریب تعیین وزنی
مشخصه	NS	R^2	Br^2
مقدار	۰/۵۹(رضایت‌بخش)	۰/۶۹	۰/۶۲



شکل ۷- مقایسه هیدروگراف های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبار سنجی با پایه زمانی ماهانه.



شکل ۸- نمودار همبستگی مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده دوره اعتبارسنجی.

٤-نتیجه‌گیری

با اجرای مدل SWAT در حوزه آبخیز درونگر و مقایسه ظاهری و آماری هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف شبیه‌سازی شده توسط مدل، مشخص گردید شباهت زیادی بین هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره شبیه سازی مورد مطالعه وجود دارد و در مورد ویژگی‌های مهم هیدروگراف از قبیل دبی پیک لحظه‌ای، حجم رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج، بین دو هیدروگراف تطابق مناسبی وجود دارد.

بررسی شاخص‌ها و نمودارهای بدست آمده در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی مدل برای شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه، نشان می‌دهد که مدل در مرحله اعتبار سنجی موفق‌تر عمل کرده است. به دلیل بدست آمدن مقادیر بالای شاخص‌های ارزیابی، مدل‌سازی بسیار خوب زمان وقوع دبی‌های اوج و دبی‌های پایه و علی‌رغم بیشتر برآورد نمودن مقادیر دبی‌های اوج، نتایج مدل‌سازی مطلوب می‌باشد. به طور کلی نتایج بدست آمده نشان‌دهنده توانایی و دقت قابل قبول مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی رواناب ماهانه حوزه آبخیز ارازکوسه می‌باشد. یافته‌های این تحقیق، نتایج مطالعات Changbin et al., 2010، Ndomba & Birhanu, 2008، Shimelis et al., 2010، Xu et al., 2009 که به طور کلی توانایی مدلSWAT در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوزه‌های مورد مطالعه را رضایتبخش اعلام کردند، تایید می‌کند.

در مجموع نتایج تحقیق حاکی از آن است که مدلSWAT قابلیت شبیه سازی هیدرولوژیک در حوزه های آبخیز نسبتاً بزرگ با شرایط پیچیده و ناهمگن با دقت قابل قبول را دارد البته به شرط این که داده های ورودی با دقت مناسب در مدلسازی استفاده شوند و نیز دقت و توجه کافی در واسنجی مدل صورت گیرد تا مدل هر چه بیشتر معرف شرایط واقعی حوزه باشد.

بر اساس نتایج آنالیز حساسیت ۲۰ پارامتر موثر بر رواناب در مدل SWAT شناخته شد که پارامترهای شماره منحنی (CN2)، حداقل میزان ذوب برف (SMFMN)، حداقل مقدار ذخیره آب برای رویداد جریان پایه (GWQMN) فاکتور جبران تبخیر خاک (EPCO)، حداکثر میزان ذوب برف (SMFMX)، و آب نگه داشته شده توسط پوشش گیاهی (CANMX) از پارامترهای بسیار مهم در تعین میزان دبی رواناب خروجی از حوضه شناخته شدند که از بین آن‌ها عامل شماره منحنی (CN2)، به عنوان حساس‌ترین پارامتر تشخیص داده شد.

مقایسه آماری این مدلسازی نتایج تقریباً قابل قبولی را نشان داده است به‌طوری‌که مقایسه آماری هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی به‌کار رفته در این تحقیق با معیار ناش – ساتکلیف همبستگی حدود ٦٨ درصدی هیدروگراف‌ها را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که مدل فیزیکی SWAT با توجه به

نتایج حاصل از شبیه‌سازی، در حوزه سملقان کارایی قابل قبولی دارد.

٦- منابع

1- Akbari H. (2010). Simulation of daily flow of Chehel Chay river in Golestan province using SWAT model. Master Thesis in Watershed Management Department. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 120 p. (In Persian)
2- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. J. Amer. Water Resour. Assoc. 34(1): 73-89.
3- Changbin, Li., Jiaguo, Qi., Zhaodong, Feng., Runsheng, Yin., Songbing, Zou and Feng, Zhang. (2010). Parameters optimization based on the combination of localization and auto-calibration of SWAT model in a small watershed in Chinese Loess Plateau. Front. Earth Sci. China 2010, 4(3): 296–310.
4- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., and Yang, H. (2009). Modelling blue and. green water resources availability in Iran. Hydrological processes. 23, P:486–501.
5- 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.
6- Mehrparvar M, Asghari K, Golmohammadi MH (2019) Reducing error of rainfall-runoff simulation using coupled hydrological SWAT model and data assimilation technique. Journal of Iran-Water Resources Research 14(5):84-96 (In Persian)
7- Memarian, H,. Balasundram, S,k,. Abbaspour, K, C,. Talib, J, B,. Sung, C, T, B,. Sood, A, C,. (2014). SWAT-based Hydrological Modelling of Tropical Land UseScenarios. Hydrological Sciences Journal. DOI: 10.1080/02626667.2014.892598
8- Ndomba P.M. and Birhanu B.Z., (2008), Problems and Prospects of SWAT Model Applications in NILOTIC Catchments, Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine, 1, 41-52.
9- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R., (2011). Soil and waterassessment tool, theoretical documentation, version 2009. Texas Water Research Institute,Technical Report 40۶
10- Noori Z., Talebi A., Asadi A., (2019). Investigating SWAT Model Efficiency to Determine Water Balance Components (Case Study: Semirom Mehrgerd Watershed). Journal of Iran-Water Resources Research. Volume 15, No. 3, Fall 2019 (IR-WRR) 133-143 (In Persian)
11- Rahmati, f. M, H, Rezaei Moghaddam. Nikjoo. M , R. 2021. The Effects Of Land use Change On Erosioد & Flood In Saqqez basin Before & After Shahid Kazemi Dam Construction, Arc Swat model. Journal of Geography and human relations. Summer 1400, Volume 4, Number 1, pp. 144-1. (In Persian)
12- Rivas-Tabares D, Tarquis A N, Willaarts B, Miguel A (2019) An accurate evaluation of water availability in sub-arid Mediterranean watersheds through SWAT: Cega-

Eresma-Adaja. Journal of Agricultural Water Management 212:211-225
13- Rostamiyan R. (2005). Estimation of runoff and sediment in Beheshtabad basin in North Karun using model of SWAT. Master Thesis in Engineering. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. 150 p. (In Persian)
14- Shimelis, G., Setegn, Bijan Dargahi., Ragahavan, Srinivasan and Assefa, M. Melesse. (2010). Modeling of sediment yield from Anjeni-Gauged watershed, Ethiopia using SWAT model. Journal of the American water resources association, Vol. 46, No. 3. June 2010.
15- Xu, Z. X., Pang, J. P., Liu, C. M., and Li, J. Y. (2009). Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model. Hydrological Processes. Hydrol. Process. 23, 3619–3630 (2009).
16- Zahedi, E. (2013)., Determining the suitable sites for groundwater dams construction using the water balance simulation (SWAT model) and analytical network process (ANP), Watershed Master's thesis, University of Yazd. (In Persian)