

مقدمه

مقدار رواناب بسته به شرایط هیدرولوژیکی، خاک و پوشش گیاهی در سطح حوضه تغییر می‌کند و این باعث می‌شود که شبیه‌سازی فرآیندهای مذکور نیازمند ارائه اطلاعات لازم از چگونگی تغییرات مکانی این عوامل باشد. در این رابطه با توجه به توسعه مدل‌هایی که با استفاده از امکانات سامانه اطلاعات جغرافیایی اجراء می‌شوند، دقت مکانی می‌تواند اهمیت داشته باشد و انتخاب مناسب اندازه سلولی در نقشه‌های رقومی را ضرورت می‌بخشد [۷]. در راستای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی، مدل‌های مختلفی در شبیه‌سازی پاسخ حوزه آبخیز در برابر بارش وجود دارد که امروزه با دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های رقومی، امکان شبیه‌سازی پاسخ آبخیز به یک بارش با خصوصیات معین با کمک مدل‌های توزیعی وجود دارد [۳۳].

انتخاب یک مدل مناسب وابسته به عامل‌هایی از قبیل توانایی شبیه‌سازی متغیرهای طراحی (رواناب سطحی، آب‌های زیرزمینی، بار رسوب ویژه)، دقت و صحت، داده‌های در دسترس و مقیاس‌های مکانی و زمانی می‌باشد. در سال‌های اخیر توصیف و استخراج شبکه آبراه‌ها با کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع انجام می‌شود [۱۹]. مدل SWAT^۵ یکی از مدل‌های نیمه توزیعی بوده که نیازمند به‌کارگیری اطلاعات مکانی در شبیه‌سازی است. از جمله مهم‌ترین اطلاعات مکانی مورد نیاز در این مدل، نقشه رقومی ارتفاع است که در استخراج مشخصات فیزیوگرافی حوزه آبخیز، برآورد توزیع مکانی رواناب و بار رسوب نقش دارد [۱۵]. مدل SWAT ابزاری برای ارزیابی آب و خاک می‌باشد. اساس این مدل معادله بیلان آبی است و به‌منظور پیش‌بینی اثرات فعالیت‌های مدیریت اراضی بر رواناب، تولید رسوب و کیفیت آب حاصل از منابع غیرنقطه‌ای در مقیاس حوزه آبخیز با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت در بازه‌ی زمانی طولانی توسعه یافته است [۲۸].

مطالعات مختلفی در خصوص استفاده از مدل SWAT در شبیه‌سازی مناسب اجزای هیدرولوژیکی گزارش شده است که از آن جمله می‌توان به شبیه‌سازی دبی و رسوب [۱، ۲۰، ۲۴، ۲۷، ۳۱، ۳۴، ۴۰، ۴۲]، مولفه‌های منابع آب [۱۵]، تحلیل عدم قطعیت‌های بارش در شبیه‌سازی جریان [۳۵]، اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه [۲۲] و اثر

ارزیابی تأثیر دقت مکانی مدل رقومی ارتفاع در برآورد دبی روزانه حوزه آبخیز ارازکوسه با استفاده از مدل SWAT

رضا فرد^۱، مهدی وفاخواه^۲ و حمیدرضا مرادی^۳
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۳

چکیده

کیفیت مکانی مدل رقومی ارتفاع اثر زیادی در شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT دارد. بر این اساس هدف این مطالعه ارزیابی اثر دقت مکانی سه نوع لایه مدل رقومی ارتفاع با دقت‌های مکانی ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ متر بر نتایج شبیه‌سازی دبی روزانه در حوزه آبخیز ارازکوسه واقع در حوزه آبخیز گرگانرود، استان گلستان می‌باشد. ابتدا مدل با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۱۰ متر و داده‌های اقلیمی سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۲ اجراء شد به‌طوری‌که سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۷ برای گرم کردن مدل، سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۷ برای واسنجی و سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۲ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. در دوره واسنجی نتایج ضریب تعیین در بازه ۰/۴۰ تا ۰/۶۰ و نمایه کارایی نش-ساتکلیف در بازه ۰/۳۷ تا ۰/۵۸ بدست آمد. هر دو نمایه در مرحله اعتبارسنجی نسبت به مرحله واسنجی مقدار کاهش داشتند. نتایج نمایه PBIAS برای مدل‌های رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۱۰ و ۵۰ متر نشان‌دهنده بیش‌تخمینی مدل و برای مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۲۰۰ متر نشان‌دهنده کم‌تخمینی مدل بود. نتایج پژوهش نشان داد که برای شبیه‌سازی دبی در مقیاس زمانی روزانه برای حوزه آبخیز ارازکوسه بهترین دقت مکانی ۵۰ متر می‌باشد.

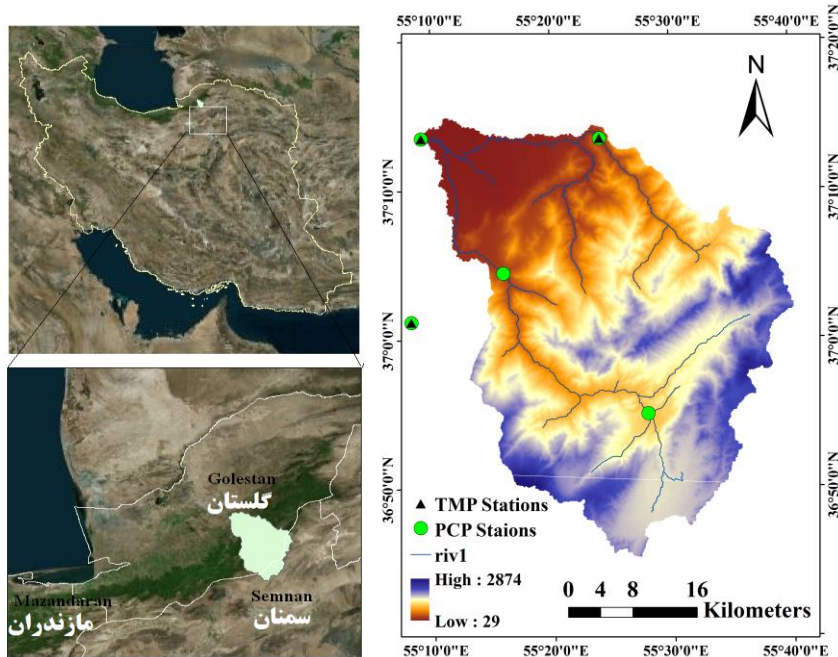
کلیدواژه‌ها: اعتبارسنجی، حوزه آبخیز ارازکوسه، دقت

مکانی، مدل بارش-رواناب، واسنجی، SUFI-2

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، ایران.
- ۲- نویسنده مسئول و استاد، گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، ایران. پست الکترونیک: vafakhah@modares.ac.ir
- ۳- استاد، گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس، ایران.

4. Digital Elevation Model/DEM

5. Soil and Water Assessment Tool



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز ارازکوسه در کشور و استان گلستان

Fig 1. Location of Arazkuseh watershed in Iran and Golestan province

در این تحقیق از سه لایه مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ متر استفاده شد. مدل‌های رقومی ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متر از سازمان نقشه‌برداری کشور (NIDEM) تهیه شدند و مدل رقومی ارتفاع ۲۰۰ متر با تغییر اندازه پیکسل مدل رقومی ارتفاع SRTM¹ که دارای دقت مکانی ۹۰ متر می‌باشد به ۲۰۰ متر تهیه شد. شکل ۲ لایه‌های DEM مورد استفاده در تحقیق را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی هیدرولوژیکی

در این تحقیق برای ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوزه آبخیز تحت تغییرات دقت مکانی DEM از مدل ArcSWAT نسخه ۲۰۱۲ الحاقیه نرم افزار ArcGIS نسخه ۲/۱۰ استفاده شد. ابتدا مدل SWAT با استفاده از مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۱۰ متر با توجه به داده‌های اقلیمی از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۳ اجرا شد و سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ برای گرم کردن^۲ مدل در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP نتایج مدل واسنجی و اعتبارسنجی شد. همچنین مدل SWAT با استفاده از دو مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۵۰ و ۲۰۰ متر به اجراء درآمد و سایر شرایط شبیه‌سازی مانند کاربری اراضی، داده‌های اقلیمی، نقشه خاک ثابت در نظر گرفته شد [۴۳]. برای هر سه مرحله اجرای مدل در تعریف واحد عکس‌العمل هیدرولوژیکی^۳ (HRU) برای برطرف کردن اثر مقادیر اندکی از کاربری اراضی، خاک و شیب هر یک به ترتیب به مقدار ۲۰، ۱۰ و ۲۰ درصد دخالت داده شدند.

عملیات حفاظت آب و خاک بر جریان رودخانه [۵] اشاره نمود. مطالعاتی نیز به بررسی اثر دقت مکانی نقشه خاک در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوضه صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان داد که نقشه‌های خاک با دقت مکانی بالاتر باعث بهبود عملکرد مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌شود [۱۳، ۱۶، ۳۲]. همچنین مطالعاتی به بررسی اثر دقت مکانی سه DEM با دقت مکانی ۵۰، ۹۰ و ۱۰۰۰ متر در شبیه‌سازی رواناب، نیترات کل و رسوب با استفاده از مدل SWAT پرداخته‌اند [۱۷، ۱۸]. نتایج این تحقیقات نشان داد که اثر دقت مکانی DEM در شبیه‌سازی رواناب محسوس می‌باشد. به همین منظور تحقیق حاضر با هدف استفاده از DEM با دقت‌های ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ متر بر عملکرد مدل هیدرولوژیکی SWAT در شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز ارازکوسه انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه با موقعیت جغرافیایی ۵۵ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی ۳۷ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی بر روی رودخانه چهل‌چای از شاخه‌های فرعی گرگانرود در مجاورت شهر گنبد منطقه مورد مطالعه این پژوهش می‌باشد. ارتفاع ایستگاه از سطح دریا ۳۴ متر و دارای تجهیزات اشل، لیمنوگراف و پل تلفریک می‌باشد. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز ارازکوسه را در استان و کشور نشان می‌دهد.

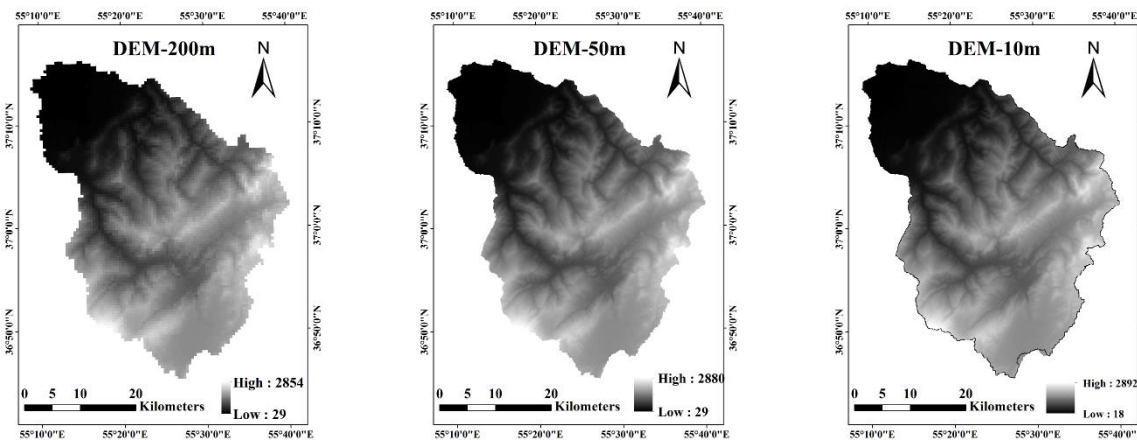
روش پژوهش

لایه‌های مدل رقومی ارتفاع

1. <http://earthexplorer.usgs.gov/>

2. Warm-Up

3. Hydrological Unit Response



شکل ۲- مدل‌های رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۲۰۰، ۵۰، ۱۰ متر

Fig 2. Digital elevation model with spatial resolution of 10×10 , 50×50 and 200×200 m

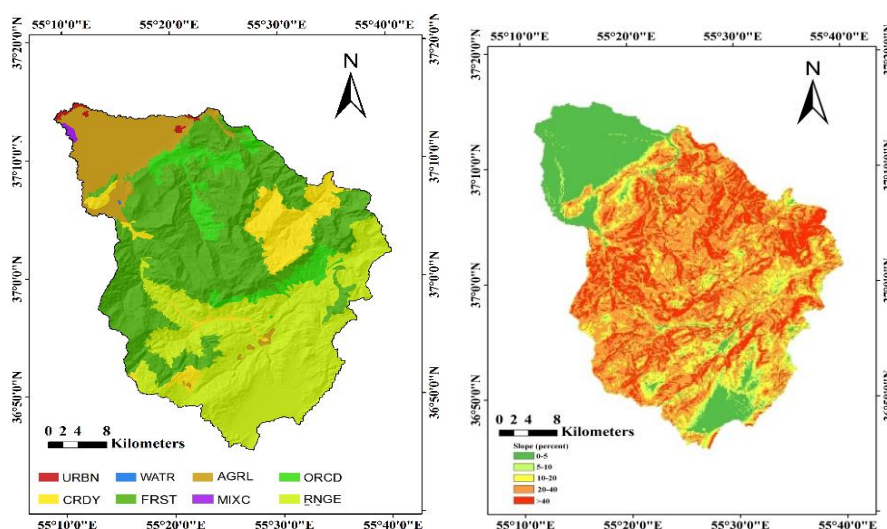
OLI8 تهیه شد. همان‌طوری که از شکل ۳ مشاهده می‌شود بیشترین درصد مساحت منطقه مربوط به اراضی کشاورزی، جنگلی و مرتعی می‌باشد.

نقشه خاک‌شناسی

از دیگر اطلاعات پایه ای مورد نیاز برای اجرای مدل SWAT نقشه خاک منطقه می‌باشد. اطلاعات خاک ورودی مورد نیاز مدل شامل دو گروه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی می‌باشد. خصوصیات فیزیکی باعث حرکت آب و هوا در درون پروفیل خاک می‌شود و همچنین نقش عمده‌ای بر چرخه آب در سطح HRU ایفا می‌کند. فایل داده‌های ورودی خاک، خصوصیات فیزیکی را برای تمام لایه‌های خاک تعیین می‌کند. لایه خاک مدل از پروژه تحقیقاتی سلمانی [۳۲] اخذ شد. شکل ۴ نقشه خاک حوزه آبخیز ارازکوسه را نشان می‌دهد.

نقشه شیب و کاربری اراضی

بر اساس لایه‌های DEM ورودی به مدل حوضه به پنج کلاس شیب ۰-۵ درصد، ۵-۱۰ درصد، ۱۰-۲۰ درصد، ۲۰-۴۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد کلاس‌بندی شد (شکل ۳). نتایج کلاس‌بندی شیب نشان می‌دهد که با توجه به کوهستانی بودن منطقه کلاس شیب بیش از ۴۰ درصد بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز ارازکوسه نیز در شکل ۳ ارائه شده است. نقشه کاربری اراضی در هشت طبقه، اراضی کشاورزی (AGRL)، اراضی دیم (CRDY)، اراضی مرتع (RNGE)، بایر (BARR)، ترکیب اراضی مرتعی و کشاورزی (MIXC)، پهنه آبی (WATR)، مناطق مسکونی (URBN) و جنگل (FRST) با روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال با استفاده از تصویر ماهواره‌ای Landsat



شکل ۳- نقشه‌های شیب و کاربری اراضی حوزه آبخیز ارازکوسه

Fig 3. Slope and land use and maps of Arazkush watershed

است استفاده شد. گام دوم فرایند واسنجی می‌باشد که شامل فرایند بهتر پارامترسازی مدل نسبت به شرایط واقعی و کاهش عدم قطعیت است. واسنجی مدل انتخاب دقیق مقادیر برای پارامترهای ورودی (با محدوده عدم قطعیت مشخص) و مقایسه پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی در شرایط یکسان است. گام نهای نیز واسنجی مولفه‌های مورد نظر است. این فرایند شامل اجرای مدل با استفاده از پارامترهای بکار رفته در مرحله واسنجی و مقایسه پیش‌بینی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی است که در مرحله واسنجی استفاده نشده‌اند. واسنجی نشان می‌دهد که مدل توانایی شبیه‌سازی صحیحی را دارد که این میزان صحت به اهداف پروژه بستگی دارد [۲].

معیارهای ارزیابی مدل SWAT

در طول واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی لازم است تا عملکرد مدل ارزیابی شود. این کار به‌واسطه‌ی مقایسه آماری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای صورت می‌گیرد. برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل از نمایه‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی نش-ساتکیف (NS) (رابطه ۱)، (R^2) (رابطه ۲)، R-factor (رابطه ۳) و P-factor (رابطه ۴) استفاده شد. ضریب R^2 بین ۰ تا ۱ متغیر بوده که مقادیر نزدیک به ۱ نشان دهنده‌ی مطابقت بیشتر مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای می‌باشد. مقدار ضریب NS یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. هرچه میزان ضریب NS به مقدار یک نزدیک‌تر باشد نتایج حاصل از صحت بیشتری برخوردار است [۲۵]. ضریب PBIAS نیز افزایش یا کاهش درصد متوسط تمایل داده‌های شبیه‌سازی شده را نسبت به داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهد و مقدار مطلوب صفر است. مقدار مثبت و منفی به ترتیب نشان دهنده‌ی کم و بیش تخمینی مدل است [۱۷].

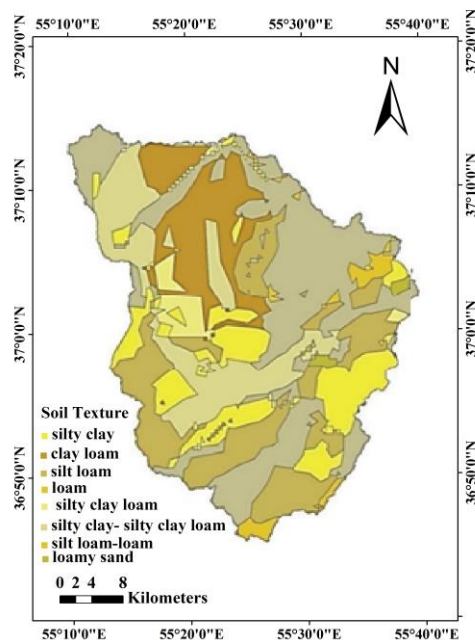
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i - Qs_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qo_i - \bar{Qo})^2} \quad (1)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Qo_i - Qs_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n Qo_i} \right] \quad (2)$$

$$r = \frac{\bar{d}_x}{\sigma_x} \quad (3)$$

$$\bar{d}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_U - X_L)_i \quad (4)$$

در این روابط: Qo_i و Qs_i به ترتیب جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در گام زمانی i (مترمکعب بر ثانیه)، \bar{Qo} : متوسط دبی جریان مشاهده‌ای، n : تعداد روزها در طول دوره شبیه‌سازی، X_U و X_L به ترتیب حدود بالا و پایین عدم قطعیت پیش‌بینی با احتمال ۹۵ درصد و σ_x : انحراف از معیار داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد.



شکل ۴- نقشه خاک حوزه آبخیز ارازکوسه

Fig 4. Soil map of the Arazkuseh watershed

پارامتری کردن و مراحل واسنجی با SUFI-2

انتخاب پارامترهای مناسب گامی مهم در فرایند واسنجی مدل است که باید بر اساس شناخت فرایندهای هیدرولوژیکی و بر اساس تغییرات نوع خاک، کاربری اراضی و شیب باشد که زیرحوضه‌ها در آن واقع می‌شوند. بنابراین واژه پارامتری کردن را می‌توان به عنوان فرایند دانش تحلیلی فرایندهای فیزیکی در مدل تعریف کرد. هیچ روش واسنجی خودکار نمی‌تواند جایگزین فرایندهای فیزیکی بالقوه در حوزه آبخیز شود بلکه می‌تواند محدوده مناسبی از مقادیر پارامترها را در بخش‌های مختلف حوضه جایگزین کند. این محدوده به طور موثر می‌تواند به بهینه‌سازی پارامترها کمک کند. بنابراین پارامتری کردن صحیح مدل باعث افزایش سرعت واسنجی مدل و کاهش عدم قطعیت مدل می‌شود. SWAT-CUP شامل روش‌های خودکار و همچنین نیمه‌خودکار برای واسنجی مدل است که در این پژوهش برای واسنجی از روش SUFI-2 استفاده شد [۴].

آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی

گام اول در فرایند واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT تعیین حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی حوزه یا زیرحوضه‌های آبخیز است. کاربرد بر اساس نظر کارشناسی یا آنالیز حساسیت تعیین می‌کند که کدام پارامترها باید تعدیل شوند. آنالیز حساسیت فرایند تعیین میزان تغییرات در خروجی مدل با در نظر گرفتن تغییرات در پارامتر (پارامترهای) ورودی مدل است. در واسنجی شناسایی پارامترهای کلیدی و صحت پارامتر مورد نیاز است [۳۸]. برای انجام آنالیز حساسیت از روش "یک پارامتر در هر بار" که متعارف‌ترین روش حساسیت‌سنجی

1. One Factor At a Time (OAT)

نتایج

اجرای اولیه مدل

پس از ورود لایه DEM به مدل و تعیین نقطه‌ی خروجی حوزه آبخیز ارازکوسه به ۲۷ زیر حوضه تقسیم شد که در شکل ۵ آمده است. مدل Arc SWAT با کمک لایه DEM مسیر آبراه‌های حوضه را مشخص کرد و سپس این نقشه خروجی با نقشه آبراهه تهیه شده از اداره منابع طبیعی استان گلستان مقایسه شد که هرچند انشعاب کمتری داشت اما از تطبیق مکانی خوبی برخوردار بود. در مرحله بعد برای تعریف HRU به ترتیب نقشه‌های کاربری اراضی با هفت کلاس و خاک با ۵۳ کلاس به مدل معرفی شدند. در نهایت نیز کل آبخیز بر اساس خصوصیات غالب خاک و کاربری اراضی به ۲۷ واحد HRU تقسیم شد. در مرحله بعد نیز داده‌های اقلیمی شامل

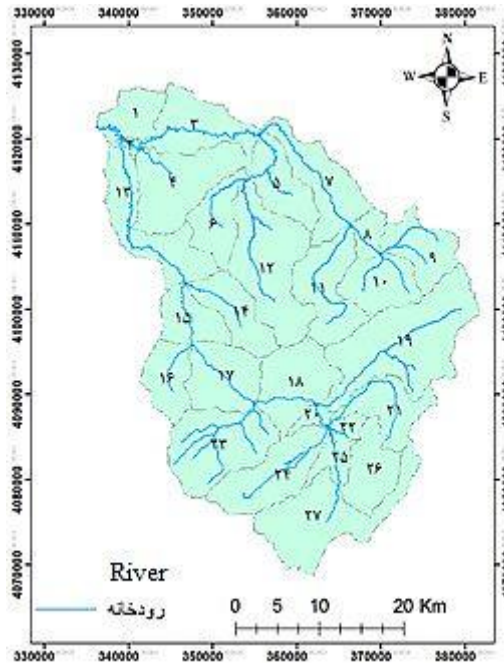
بارندگی و درجه حرارت به مدل وارد شدند.

نتایج تحلیل حساسیت

جدول ۱ نتایج حاصل از تحلیل حساسیت با استفاده از پارامترهای موثر در شبیه‌سازی دبی در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه برای مدل‌های رقومی ارتفاع مربوطه نشان می‌دهد. برای هر سه نوع DEM با دقت مکانی مختلف پارامترهای CN2، SOL_K SOL_AWC و SOL_BD به ترتیب حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی شناخته شدند.

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل

جدول ۲ نمایه‌های آماری واسنجی و اعتبارسنجی مدل و شکل‌های ۶ تا ۸ نمودارهای دبی شبیه‌سازی شده را برای مدل‌های رقومی ارتفاع مختلف در دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهند.



شکل ۵- موقعیت زیرحوضه‌ها و آبراه‌های استخراج شده با SWAT

Fig 5. The location of extracted sub-watersheds and streams using SWAT

جدول ۱- مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای بهینه برای مدل‌های رقومی ارتفاع ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ متر

Table 1. The minimum and maximum values of optimal parameters for DEMs with spatial resolution of 10, 50 and 200 m.

۲۰۰ متر		پارامتر	sensitivity	۱۰ و ۵۰ متر		پارامتر	sensitivity
حداقل	حداکثر			حداقل	حداکثر		
Min.	Max.		Min.	Max.			
0	0.4	r_CN2.mgt	-0.3	0.1	r_CN2.mgt	1	
-0.4	0	r_SOL_AWC(1).sol	0	0.4	r_SOL_AWC(1).sol	2	
-0.6	0	r_SOL_K(1).sol	-0.8	-0.2	r_SOL_K(1).sol	3	
1500	3000	r_SOL_BD(1).sol	0.1	0.6	r_SOL_BD(1).sol	4	
250	450	v_ALPHA_BF.gw	0	0.5	v_ALPHA_BF.gw	5	
0	0.5	v_GWQMN.gw	100	1900	v_GWQMN.gw	6	

0.7	1	v_REVAPMN.gw	7	250	450	v_REVAPMN.gw	7
0.7	1	v_RCHRG_DP.gw	8	0.4	0.9	v_RCHRG_DP.gw	8
0.2	0.3	v_ESCO.hru	9	0.7	1	v_ESCO.hru	9
90	130	v_EPCO.hru	10	0.7	1	v_EPCO.hru	10
45	85	v_CH_N2.rte	11	0	0.2	v_CH_N2.rte	11
0	0.5	v_CH_K2.rte	12	450	105	v_CH_K2.rte	12
9		v_SLSUBBSN.hru	13	15	65	v_SLSUBBSN.hru	13
0.6		v_ALPHA_BNK.rte	14	0	1	v_ALPHA_BNK.rte	14
0.3		v_SMFMN.bsn	15	6.1		v_SMFMN.bsn	15
39		v_TIMP.bsn	16	0.4		v_TIMP.bsn	16
58		v_CANMX.hru_____FRSD	17	61		v_CANMX.hru_____FRSD	17
43		v_CANMX.hru_____RNGE	18	51		v_CANMX.hru_____RNGE	18

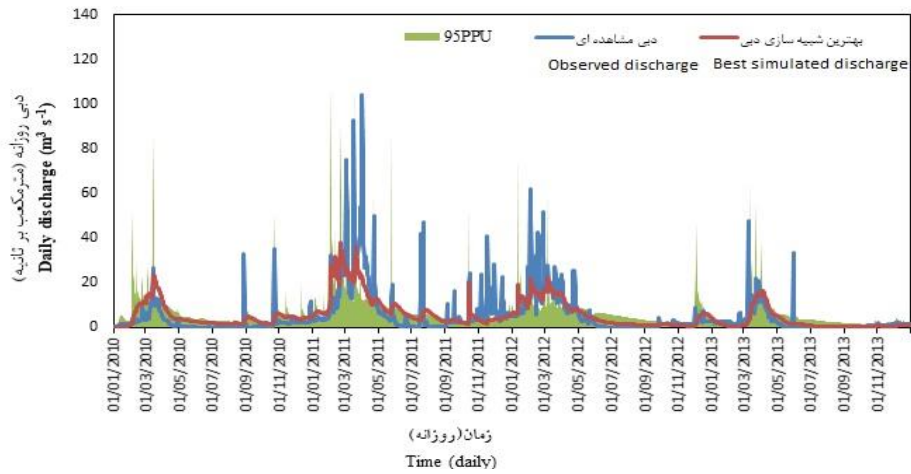
CN2: شماره منحنی، SOL_AWC: محتوای آب خاک، SOL_K: هدایت هیدرولیکی خاک، SOL_BD: چگالی خاک، GWQMN: جریان آب زیرزمینی، REVAPMN: عمق آستانه آب در سفره کم عمق، RCHRG_DP: نفوذ عمیق آبخوان، ESCO: عامل جبران تبخیر خاک، EPCO: ضریب جبران جذب گیاه، CH_N2: مقدار «n» مانینگ برای آبراهه اصلی، CH_K2: هدایت هیدرولیک مؤثر در آبرفت، SLSUBBSN: طول شیب متوسط زیرحوضه، ALPHA_BNK: عامل آلفای جریان پایه، SMTMP: ذوب برف، TIMP: ضریب تاخیر ذوب توده برف، FRSD-CANMX: حداکثر ذخیره تاج پوشش جنگل همیشه سبز، RNGE-CANMX: حداکثر ذخیره تاج پوشش مرتع

CN2: Curve Number, SOL_AWC: Soil Water Content, SOL_K: Soil Hydraulic Conductivity, SOL_BD: Soil Density, GWQMN: Groundwater Flow, REVAPMN: Water Threshold Depth at Shallow Aquifer, RCHRG_DP: Deep Aquifer Infiltration, ESCO: Compensation factor for soil evaporation, EPCO: Plant uptake compensation coefficient, CH_N2: Manning “n” value for main waterway, CH_K2: Effective hydraulic conductivity in alluvial, SLSUBBSN: Medium basin slope length, ALPHA_BNK: Base flow alpha factor, SMTMP: Snowmelt, TIMP: Melting snow mass, CANMX-FRSD: Maximum evergreen forest canopy cover, CANMX-RNGE: Maximum canopy-pasture cover

جدول ۲- نمایه‌های آماری دبی شبیه‌سازی در مرحله واسنجی با لایه‌های DEM با دقت مکانی ۱۰، ۵۰ و ۲۰۰ متر

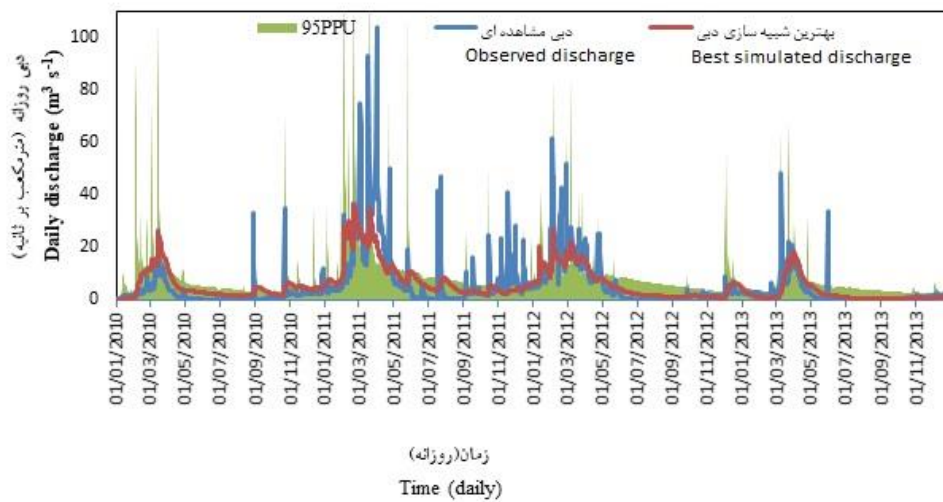
Table 2. The statistical criteria of the simulated discharge in the calibration and validation stages with DEM in spatial resolution of 10, 50 and 200 m

۲۰۰ متر 200 m		۵۰ متر 50 m		۱۰ متر 10 m		نمایه آماری Statistical criteria
اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	اعتبارسنجی Validation	واسنجی Calibration	
0.40	0.48	0.60	0.69	0.43	0.52	R ²
0.37	0.47	0.58	0.67	0.41	0.50	NS
1.2	-7.5	-0.02	-15.2	-0.03	-5.5	PBIAS
0.63	0.83	0.70	0.68	0.79	0.71	P-factor
0.85	1.08	0.99	1.13	0.55	0.41	R-factor
5.30	4.71	5.30	4.71	5.30	4.71	میانگین دبی مشاهده‌ای Mean observed discharge
4.18	5.07	5.65	5.43	5.58	5.03	میانگین دبی شبیه‌سازی Mean simulated discharge



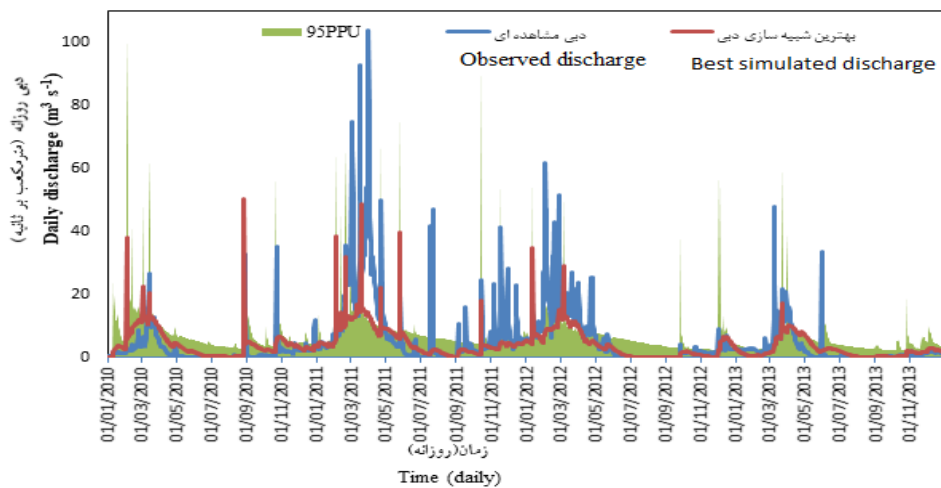
شکل ۶- دبی شبیه سازی شده در مرحله اعتبارسنجی با مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متر

Fig 6. The simulated discharge in the validation stage with DEM in spatial resolution of 10 m



شکل ۷- دبی شبیه سازی شده در مرحله اعتبارسنجی با مدل رقومی ارتفاع ۵۰ متر

Fig 7. The simulated discharge in the validation with DEM in spatial resolution of 50 m



شکل ۸- دبی شبیه سازی شده در مرحله اعتبارسنجی با مدل رقومی ارتفاع ۲۰۰ متر

Fig 8. The simulated discharge in the validation with DEM in spatial resolution of 200 m

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که پارامترهای CN2 (شماره منحنی)، SOL_AWC (رطوبت خاک) و SOL_K (هدایت هیدرولیکی اشباع) و چگالی توده خاک (SOL-BD) به ترتیب حساسترین پارامترها در شبیه‌سازی دبی هستند. لذا نتایج نشان می‌دهد که پارامتر شماره منحنی (CN2) بیشترین تأثیر را بر تولید رواناب می‌گذارد. تغییر در مقدار این پارامتر سبب می‌شود که مقدار رواناب سطحی، جریان جانبی و تبخیر و تعرق به صورت نمایی تغییر نماید. به طوری که 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 [۲۶]. بر این اساس در جریان واسنجی مدل، پارامتر CN2 باید در شبیه‌سازی حجم رواناب مورد توجه ویژه قرار گیرد، ولی برای کنترل جریان پایه نمی‌تواند حائز اهمیت باشد. CN2 نشان‌دهنده شماره منحنی در روش SCS برای شرایط رطوبتی متوسط می‌باشد. شماره منحنی تابعی از نفوذپذیری خاک (گروه‌های هیدرولوژیکی خاک)، کاربری اراضی و شرایط رطوبت پیشین خاک است. شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط برای پوشش‌های مختلف زمین و انواع خاک بر اساس مطالعات تعیین شده است [۴۰]. از آنجایی که نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک بیشترین تأثیر را بر روی مقادیر شماره منحنی دارد و این پارامتر یکی از مهمترین پارامترها در مدل SWAT می‌باشد [۳۶، ۹]. لذا در این تحقیق نیز این پارامتر رتبه نخست حساسیت در شبیه‌سازی جریان به خود اختصاص داد. اهمیت پارامتر CN منطقی است، زیرا این پارامتر مقدار رواناب تولیدی را تعیین می‌کند. در نتیجه این پارامتر تأثیر عمده‌ای بر مولفه‌های بیلان آبی و شبیه‌سازی جریان دارد [۲۹، ۱۷]. Wu و Chen [۴۱] سه پارامتر CN2 (شماره منحنی)، GWQMN.gw (حداقل عمق مورد نیاز سطح ایستابی در سفره‌های کم عمق برای وقوع جریان) و RCHRG_DP (درصد تغذیه سفره عمیق از سفره کم عمق) را به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر در شبیه‌سازی دبی گزارش کردند که در تحقیق ایشان پارامتر RCHRG_DP دارای کمترین حساسیت در شبیه‌سازی جریان بود.

نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که بالاترین ضریب R^2 و NS برای DEM ۵۰ متر به ترتیب با ضرایب ۶۹/۰ و ۶۰/۰ حاصل شد. همچنین کمترین نمایه‌های آماری R^2 و NS برای DEM با دقت مکانی ۲۰۰ متر بدست آمد که ضرایب R^2 و NS به ترتیب ۴۸/۰ و ۴۷/۰ بدست آمد. در صورتی که نمایه نش - ساتکلیف بیش از ۵۰/۰ و ضریب PBIAS دارای مقدار ± 25 باشد نتیجه شبیه‌سازی برای دبی رضایت‌بخش می‌باشد [۲۳]. با توجه به این شرط، نتایج شبیه‌سازی دبی با DEM ۵۰ متر در مرحله واسنجی با توجه به ضرایب کارایی نش-ساتکلیف و PBIAS دارای نتیجه رضایت‌بخشی است. نمایه PBIAS بیش‌تخمینی و کم‌تخمینی مدل را در شبیه‌سازی دبی نشان می‌دهد. نتیجه واسنجی برای تمامی مدل‌های رقومی ارتفاع با توجه به ضریب PBIAS بیش‌تخمینی مدل را نشان می‌دهد، زیرا تمامی

ضرایب منفی بدست آمد. مدل SWAT، بارش را با استفاده از متوسط دمای روزانه به صورت باران یا برف تقسیم‌بندی می‌کند. با توجه به ضعف مدل در شبیه‌سازی ذوب برف [۱۲] می‌توان نتیجه گرفت که ممکن است مدل در شبیه‌سازی ذوب برف در مناطق کوهستانی در فصول سرد که سرچشمه جریان در رودخانه هستند ضعیف عمل کرده و جریان را نتوانسته شبیه‌سازی نماید. عامل دیگر می‌تواند ناشی از پایه فیزیکی روش SCS باشد. این روش نمی‌تواند رواناب حاصل از ذوب برف و آب یخ‌زده روی زمین را شبیه‌سازی کند [۱۰، ۱۱]. همچنین روش مذکور مدت و شدت بارندگی را هم در نظر نمی‌گیرد [۲۱]. مطالعات بسیاری گزارش کرده‌اند که مدل SWAT به دلیل ضعف در شبیه‌سازی ذوب برف توانایی شبیه‌سازی نقاط اوج دبی را ندارد [۱، ۸، ۳۴، ۳۹]. نمودارهای مربوط به واسنجی با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه نشان می‌دهد که نقاط اوج در بازه زمانی ۲۰۰۱۱/۱/۱ تا ۲۰۱۲/۱/۷ از لحاظ مقدار دارای کم‌تخمینی می‌باشد اما از نظر گام زمانی به درستی شبیه‌سازی شده است. بهترین مقدار شبیه‌سازی اوج برای مدل رقومی ارتفاع ۵۰ متر است. ضریب PBIAS برای مدل‌های رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۱۰ و ۵۰ متر مقدار عددی منفی که نشان‌دهنده بیش‌تخمینی مدل و برای مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۲۰۰ متر مقدار عددی مثبت بدست آمد که نشان‌دهنده بیش‌تخمینی نتایج شبیه‌سازی دبی در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه است. اگرچه با توجه به نمایه‌های آماری نتایج مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی رضایت‌بخش بوده، اما مدل SWAT نتوانسته نقاط اوج دبی را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. علت ضعیف‌تر بودن نتایج شبیه‌سازی جریان با مدل رقومی ارتفاع ۱۰ متر نسبت به ۵۰ متر به دلیل اثرات جزئیات توپوگرافی در مدل رقومی ارتفاع با دقت بالاتر و اندازه شبکه‌های کوچک در شیب و تجمع جریان برای تعیین میزان رواناب سطحی بود [۱۴]. همچنین ویژگی‌های توپوگرافی به دلیل وجود اندازه پیکسل بزرگتر برای مدل رقومی ارتفاع با دقت ۲۰۰ متر ممکن است باعث خطا در پیش‌بینی‌های شاخص توپوگرافی شود [۱۴]. در حقیقت مقیاس بهینه مطلوب DEM برای محاسبه شاخص‌های توپوگرافی در مدل SWAT به فرایند هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی و مقیاس ویژگی‌های توپوگرافیکی کنترل‌کننده پدیده هیدرولوژیکی مورد نظر بستگی دارد [۳۱]. این موضوع نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های مکانی با وضوح دقیق‌تر لزوماً عملکرد پیش‌بینی‌های مدل هیدرولوژیکی را بهبود نمی‌بخشد [۲۷] که در این مطالعه نیز مدل رقومی ارتفاع با دقت ۵۰ متر در شبیه‌سازی دبی در حوزه آبخیز ارازکوسه نتایج بهتری ارائه می‌کند.

منابع

1. Abbas, T., Hussain, F., Nabi, G., Boota, M.W., Wu, R.-S., 2019. Uncertainty evaluation of SWAT model for snowmelt runoff in a Himalayan watershed. Terr. Atmos. Ocean. Sci. 30 (2), 265-

and filtering algorithms on DEM accuracy for geomorphometric research: a case study from Sahel-Doukkala, Morocco. *Model. Earth Syst. Environ.* 4 (4), 1537–1554.

15. Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santhi, C., Arnold, J.G., 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrol. Process. An Int. J.* 19 (3), 749–762.

16. Jin, X., Zhang, L., Gu, J., Zhao, C., Tian, J., He, C., 2015. Modelling the impacts of spatial heterogeneity in soil hydraulic properties on hydrological process in the upper reach of the Heihe River in the Qilian Mountains, Northwest China. *Hydrol. Process.* 29 (15), 3318–3327.

17. Jeirani, F., Morid, S., Moridi, A., 2011. Impact of DEM Cell Size on Calibration and Predictions of Runoff and Sediment, Using SWAT-CUP. *J. Water Soil Conserv.* 18(4), 81-101. (In Persian)

18. Kavian, A., Mohammadi, M., 2019. Effects of Digital Elevation Models (DEM) Spatial Resolution on Hydrological Simulation. *Iranian J. Watershed Mang* 10(19), 36-45. (In Persian)

19. Lane, R., Coxon, G., Wagener, T., Freer, J., 2018. Parameterisation of the Dynamic TOPMODEL national-scale hydrological model using uncertain Multiscale Parameter Regionalisation., in: EGU General Assembly Conference Abstracts. p. 4815.

20. Leta, O., El-Kadi, A., Dulai, H., Ghazal, K., 2018. Assessment of SWAT Model Performance in Simulating Daily Streamflow under Rainfall Data Scarcity in Pacific Island Watersheds. *Water* 10 (11), 1533.

21. Levesque, E., Anctil, F., Van Griensven, A.N.N., Beauchamp, N., 2008. Evaluation of streamflow simulation by SWAT model for two small watersheds under snowmelt and rainfall. *Hydrol. Sci. J.* 53 (5), 961–976.

22. Lirong, S., Jianyun, Z., 2012. Hydrological response to climate change in Beijiang River Basin based on the SWAT model. *Procedia Eng.* 28, 241–245.

23. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50 (3), 885–900.

24. Mukundan, R., Radcliffe, D.E., Risse, L.M., 2010. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment. *J. Soil Water Conserv.* 65 (2), 92–104.

25. Nash, J.E., Sutcliffe, J. V, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10 (3), 282–290.

279.

2. Abbaspour, K.C., 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Fed. Inst. Aquat. Sci. Technol. Eawag, Duebendorf, Switzerland.

3. Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., Griensven, a. Van, VanLiew, M.W., Kannan, N., Jha, M.K., 2012. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *ASABE* 55 (4), 1491–1508.

4. Arnold, J.G., Williams, J.R., Maidment, D.R., 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *J. Hydraul. Eng.* 121 (2), 171–183.

5. Azari, M., Moradi, H.R., Saghafian, B., Faramarzi, M., 2013. Assessment of hydrological effects of climate change in Gourganroud river basin. *J. Water Soil* 27(3),527-547.

6. Azizi, B., 2018. Farmers: Training on Water Management in Order to Manage Droughts and Water Crisis in Iran. *Rev. Amaz. Investig.* 7 (15), 234–242.

7. Bierkens, M.F.P., Bell, V.A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L.E., David, C.H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J.S., others, 2015. Hyper-resolution global hydrological modelling: what is next? Everywhere and locally relevant. *Hydrol. Process.* 29 (2), 310–320.

8. Chu, T., Shirmohammadi, A., Montas, H., Sohrabi, T., 2002. Modeling watershed nonpoint source pollution on piedmont physiographic region using SWAT, in: ASAE Meeting Paper.

9. Cibir, R., Sudheer, K.P., Chaubey, I., 2010. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrol. Process. An Int. J.* 24 (9), 1133–1148.

10. Fereidoon, M., Koch, M., Brocca, L., 2019. Predicting rainfall and runoff through satellite soil moisture data and SWAT modelling for a poorly gauged basin in Iran. *Water* 11 (3), 594.

11. Feyereisen, G.W., Strickland, T.C., Bosch, D.D., Sullivan, D.G., 2007. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River watershed. *Trans. ASABE* 50 (3), 843–855.

12. Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., Hotchkiss, R.H., 2002. Development of a snowfall–snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *J. Hydrol.* 262 (1-4), 209–223.

13. Geza, M., McCray, J.E., 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *J. Environ. Manage.* 88 (3), 393–406.

14. Habib, A., Khoshelham, K., Akdim, N., Labbassi, K., Menenti, M., others, 2018. Impact of spatial resolution, interpolation

35. Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., Makeshin, F., 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *J. Hydrol.* 414, 413–424.
36. van Griensven, A. van, 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 (1-4), 10–23.
37. Wang, X., Melesse, A.M., 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. *Trans. ASAE* 48 (4), 1359–1376.
38. White, K.L., Chaubey, I., 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model 1. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 41 (5), 1077–1089.
39. Wang, X.Y., Lin, Q., 2011. Effect of DEM mesh size on AnnAGNPS simulation and slope correction. *Environ. Monit. Assess.* 179 (1), 267–277.
40. Williams, J.R., LaSeur, W. V, 1976. Water yield model using SCS curve numbers. *J. Hydraul. Div.* 102(9), 1241-1253.
41. Wu, H., Chen, B., 2015. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods. *Ecol. Eng.* 76, 110–121.
42. Wu, K., Johnston, C.A., 2007. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: A case study with the SWAT model. *J. Hydrol.* 337 (1-2), 187–199.
43. Zhang P, Liu R, Bao Y, Wang J, Yu W, Shen Zh, 2014. Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed. *Water Res.* 53,132-144.
26. Nasrabadi, F., Esmali Ouri, A., Akbari, H., Rostamian, R. 2014. A sensitivity analysis of SWAT model in Ghareh Su watershed, Ardabil. *Iranian Journal of Watershed Engineering and Management.* 5(4), 255-265. (In Persian)
27. Ndomba, P.M., Birhanu, B.Z., 2008. Problems and prospects of SWAT model applications in Nilotic catchments: a review. *Nile Basin Water Eng. Sci. Mag.* 1, 41–52.
28. Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009.
29. Nossent, J., 2012. Sensitivity and uncertainty analysis in view of the parameter estimation of a SWAT model of the river Kleine Nete, Belgium. *Dep. Hydrol. Hydraul. Eng. Vrije Univ. Brussel (VUB), Brussels* 462.
30. Oki, T., Kanae, S., 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790), 1068–1072.
31. Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrol. Process.* 5 (1), 59–79.
32. Salmani, H., 2011. Optimization of the parameters effecting rainfall-runoff in SWAT semi-distributed model (Case study: Ghazaghli subwatershed in Gorganroud watershed, Golestan province), M.Sc. Thesis in Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, 158p.
33. Semenova, O., Beven, K., 2015. Barriers to progress in distributed hydrological modelling. *Hydrol. Process.* 29 (8), 2074–2078.
34. Spruill, C.A., Workman, S.R., Taraba, J.L., others, 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Trans. ASAE* 43 (6), 1431–1439.

Assessment Effect of the Spatial Resolution of Digital Elevation Model on Daily Discharge Estimation of Arazkuseh Watershed Using SWAT Model

R. Fard¹, M. Vafakhah² and H. Moradi³

Received: 09-05-2021 Accepted: 15-10-2021

Abstract

The spatial quality of the Digital Elevation Model (DEM) has a great effect on the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) semi-distributed model. The purpose of this study was to evaluate the effect of spatial accuracy of three DEMs with spatial resolutions of 10, 50 and 200 m on the results of daily discharge simulation in the Arazkuseh subwatershed located in Gorganroud watershed, Golestan province, Iran. To do this, after-mentioned DEMs was obtained. First, the model was run using a DEM with a spatial resolution of 10 m and climate data from 1998 to 2013. So that 1998 to 2000 were used to warm-up the model, 2001 to 2009 to calibrate and 2010 to 2013 to validate the model. In the validation period, the results of coefficient of determination ranged from 0.40 to 0.60 and Nash-Sutcliffe efficiency criteria ranged from 0.37 to 0.58. Both criteria had a decreasing value in the validation phase compared to the calibration phase. The PBIAS criteria was negative for DEMs with 10 and 50 m spatial resolution, respectively which indicates overestimation, and positive value for DEM with 200 m spatial resolution, which represents the overestimation of the model. The results showed that the spatial resolution of 50m is the best spatial resolutions to simulate the discharge on a daily time scale for Arazkuseh watershed.

Keywords: *Arazkuseh watershed, calibration, rainfall-runoff model, spatial resolution, SUFI-2, validation*

1. M.Sc. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran

2. Corresponding Author and Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran. Email: vafakhah@modares.ac.ir

3. Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Iran