

مدل سازی هیدرولوژیکی بالا دست حوضه فرامرزی هیرمند با استفاده از مدل SWAT

حمیدرضا حاجی حسینی، محمدرضا حاجی حسینی، سعید مرید*، مجید دلاور^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴)

چکیده

یکی از چالش‌های عمده در مدیریت منابع آب، بهره‌برداری از این منابع در حوضه‌های آبریز مشترک مرزی می‌باشد. واقعیتی که هم‌اکنون کشور ایران در بهره‌برداری از رودخانه هیرمند سال‌ها است با آن مواجه می‌باشد. در چنین وضعیتی، کاربرد یک مدل مفهومی بارش-رواناب که بتواند سناریوهای مختلف مدیریتی را شبیه‌سازی کند، ابزار مناسبی خواهد بود. در این خصوص، مدل SWAT می‌تواند انتخاب مناسبی باشد. با این وجود، نیاز به داده‌های هواشناسی و رواناب مشاهداتی از موانع جدی در پیاده‌سازی چنین مدلی است. این مشکل به‌خصوص در مناطقی مثل افغانستان با زیرساخت‌های ضعیف دوچندان است. به همین دلیل، کاربرد آنها دارای مشکلات بیشتری خواهد بود. در مطالعه حاضر، به منظور بررسی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در مناطق با کمبود داده، حوضه بالادست رودخانه هیرمند به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد. بدین منظور، داده‌های رواناب ایستگاه دهرآوود از سال ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹ و بعضی داده‌های هواشناسی تهیه و برای واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌ها به کار گرفته شد. نتایج این بخش رضایت‌بخش بود، به طوری که در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی، ضرایب R^2 در خروجی حوضه به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷۰ به دست آمد. نکته قابل توجه آنکه با توجه به برنی بودن حوضه، استفاده از امکانات Elevation-Band بخش برف مدل نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود نتایج به خصوص دبی پایه داشت. علاوه بر ارزیابی قبل، نقشه برف استخراج شده از دو تصویر ماهواره‌ای لندست در ماه فوریه ۱۹۷۳ و ۱۹۷۷ زمانی که حوضه نسبتاً پوشیده از برف است، با نقشه برف تولید شده از مدل مقایسه شد که نتایج حاکی از اجرای خوب مدل بود، به طوری که ضریب R^2 در این دو تاریخ به ترتیب ۰/۸۷ و ۰/۸۲ برآورد گردید.

واژه‌های کلیدی: مدل SWAT، حوضه‌های آبریز فرامرزی، سطح پوشش برف، تصاویر لندست، رودخانه هیرمند

۱. گروه منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس تهران

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: morid_sa@modares.ac.ir

مقدمه

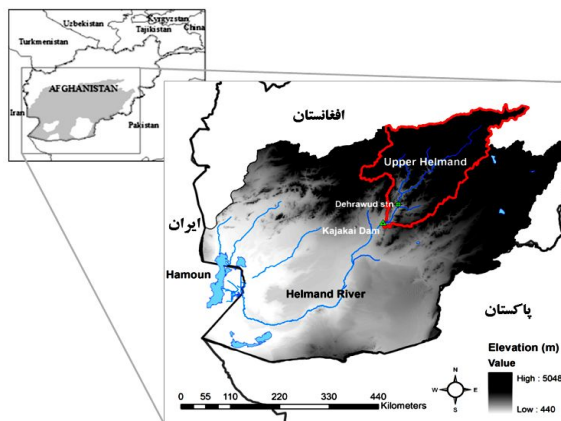
رودخانه هیرمند و ورودی آن به ایران همواره جزء مشکلات هیدروپلیتیک مدیریت منابع آب کشور بوده است (۳). بدیهی است که تنها رویکرد پایدار در این خصوص، راهبرد بهره‌برداری برد-برد است. این مهم ابزارهایی خاص خود را طلب می‌کند که از اصلی‌ترین آنها توسعه یک مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد. به‌خصوص مدل‌هایی از سنخ مفهومی با قابلیت‌های بالا برای شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی، مفیدتر خواهند بود.

به‌منظور حصول به هدف فوق، مدل‌های مختلفی قابل بررسی هستند که مدل SWAT (Soil and water Assessment Tools) می‌تواند گزینه مناسبی باشد. تحقیق روسی و همکاران (۱۵) از جمله کاربردهای مدل SWAT را به‌منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه مشترک است که برای حوضه آبریز مکنونگ به انجام رسید. این حوضه بزرگ‌ترین رودخانه شرق آسیا را در خود جای داده است که از شش کشور چین، ویتنام، میانمار، لائوس، تایلند و کامبوج عبور می‌کند. برای حفاظت و اشتراک منابع این رودخانه در سال‌های ۱۹۵۷ و ۱۹۹۵ موافقتنامه‌ای میان کشورهای منطقه امضا شده و هدف کلی این تحقیق، ارزیابی SWAT برای بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی با توجه به این موافقت‌نامه‌ها بوده است.

اما از جمله محدودیت‌های استفاده از این مدل، داده و اطلاعات نسبتاً زیادی است که نیاز دارد. محدودیتی که به مراتب در حوضه هیرمند با توجه به وضعیت زیرساخت‌های کشور افغانستان تشدید می‌گردد. تحقیقات قبلی برای حوضه‌های مشابه، محدودیت داده برای این مدل را با استفاده از پایگاه داده‌های جهانی تا حدی مرتفع کردند. از جمله شول و عباسپور (۱۶) که داده‌های اقلیمی ماهیانه پایگاه CRU (Climatic Research Unit) را با الگوریتم نسبتاً ساده DGEN به داده‌های روزانه تبدیل کرد و SWAT را برای منطقه‌ای در غرب آفریقا با مساحت ۱۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع اجرا کردند. در تلاش دیگری شول و عباسپور (۱۷) به‌منظور ارزیابی منابع آب

شیرین و میزان کمبود آن در سراسر قاره آفریقا، مدل SWAT را به‌کار بردند. در این تحقیق به‌دلیل توزیع ناهمگن و کمبود ایستگاه‌های هواشناسی، باز هم از داده‌های جهانی استفاده شد و اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از ۲۰۷ ایستگاه هیدرومتری در سطح قاره طی سال‌های ۱۹۷۱ تا ۱۹۹۵ انجام گرفت. در نهایت مقادیر مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی را در سطح زیرحوضه‌ای در آفریقا و با دقت زمانی ماهانه برآورد کردند. فدیله و همکاران (۹) نیز به‌منظور شناخت فرآیندهای مختلف هیدرولوژیکی حوضه آبریز Bouregreg واقع در شمال مرکزی مراکش، از مدل SWAT استفاده کردند. داده‌های مورد نیاز از هشت ایستگاه باران‌سنجی و ۹ ایستگاه هیدرومتری تأمین شد و به‌دلیل نبود داده‌های روزانه دما، از داده‌های اقلیمی جهانی CRU با قدرت تفکیک مکانی ۵/۵ در ۵/۵ درجه استفاده گردید.

در خصوص حوضه هیرمند، استفاده از داده‌های آب و هوایی جهانی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. اما سوابق مطالعاتی گسترده توسط سازمان‌های بین‌المللی در منطقه مطالعاتی، اهمیت منطقه از بعد هیدروپلیتیک را نشان می‌دهد که به‌مراتب فراتر از تعاملات ایران و افغانستان به‌نظر می‌آید. در خصوص برآورد پتانسیل آبی حوضه بالادست هیرمند می‌توان به مطالعه هیدرولوژیکی Harza اشاره کرد (۱۱). این مطالعه به‌منظور تخمین حداکثر سیل محتمل (PMF) در راستای طراحی سرریز سد کجکی صورت گرفت. در تحقیق دیگری تجربی و همکاران (۲) تلاش کردند همبستگی آورد سالیانه این رودخانه را با تصاویر ماهواره‌ای به تفکیک طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۰ مورد ارزیابی قرار دهد. USGS نیز در گزارشی که در سال ۲۰۰۷ منتشر نمود (۱۹)، بیلان آب حوضه بالادست رودخانه هیرمند را به‌طور مفصل مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. در این تحقیق به‌منظور تخمین رواناب و شبیه‌سازی تغییرات حجم سد کجکی، ابتدا از مدلی مشابه مدل ارائه شده توسط وندویل و الیس (۱۹) استفاده شده تا براساس آن، آب قابل دسترس ماهانه در محل ایستگاه دهاوود و تیرین برآورد گردد، همچنین در مطالعه.



شکل ۱. موقعیت حوضه هیرمند، زیرحوضه بالادست هیرمند و سد کجکی

هیرمند تا محل سد کجکی؛ به مساحت حدود ۴۷۰۰۰ کیلومترمربع و طول حدود ۵۰۰ کیلومتر است (شکل ۱). این رودخانه از کوه‌های بابایغما از سلسله کوه‌های هندوکش در شصت کیلومتری غرب کابل سرچشمه می‌گیرد و بعد از طی مسافت ۱۰۵۰ کیلومتری به دریاچه هامون در سیستم ایران می‌رسد. جریان بالقوه رودخانه هیرمند در محل دوشاخه مرزی حدود ۱۱/۶ میلیارد مترمکعب در سال و جریان بالفعل آن ۵/۶ میلیارد مترمکعب تخمین زده شده است. از این میزان حدود ۳ میلیارد مترمکعب آب در سدهای مخزنی کجکی، ارغنداب و چاه‌نیمه‌ها ذخیره می‌گردد. همچنین میزان زیادی از آب رود نیز برای آبیاری زمین‌های حاشیه رودخانه و شرب ساکنین اطراف آن، از رودخانه جدا شده و به مصرف می‌رسد. طبق آخرین پروتکل هیرمند، ایران فقط مجاز به استفاده از ۰/۸۳ میلیارد مترمکعب در سال از آب هیرمند است. متوسط بارندگی سالیانه در این بخش حدود ۲۰۰-۴۰۰ میلی‌متر است (۱۲). ارتفاعات بابایغما که سرچشمه رودخانه هیرمند در آن قرار گرفته، دارای ارتفاعی در حدود ۵۱۴۳ متر از سطح دریا است. در پست‌ترین نقطه این بخش نیز سد کجکی در ارتفاع ۱۰۵۰ متری قرار دارد. این سد از نوع خاکی با ظرفیت مخزن ۱۸۲۹ میلیون مترمکعب در سال ۱۹۵۳ روی شاخه اصلی رود هیرمند در موقعیت ۰۵ و ۶۵ طول شرقی و ۲۰ و ۳۲ عرض شمالی ساخته شده است.

دیگری نیز که با همکاری ارتش ایالات متحده (۷ و ۸) صورت گرفت، از داده‌های سنجش از دور به منظور برآورد آب معادل برف حوضه بالادست هیرمند کمک گرفته شد. هدف از این تحقیق ارزیابی دقت داده‌های ماهواره‌ای Passive Microwave در برآورد آب معادل برف (SWE) بود. به خصوص برای حوضه‌هایی مانند هیرمند که سهم قابل توجه رواناب از ذوب برف تشکیل می‌شود. در این تحقیق آب معادل برف با استفاده از اطلاعات فوق تخمین و به دلیل نبود داده‌های مشاهداتی، نتایج آن با خروجی مدل HEC- HMS که برای شش فصل زمستانی طی سال‌های ۲۰۰۹ - ۲۰۰۴ پیاده‌سازی شده بود، مقایسه گردید. صحت‌سنجی خود مدل HEC-HMS نیز با تصاویر سطح پوشش برف و تراز سد کجکی واقع در پایین‌دست حوضه انجام گردیده بود.

با توجه به مقدمه بالا، مقاله حاضر تلاشی است برای شبیه‌سازی حوضه هیرمند با مدل SWAT و بررسی داده‌هایی که در این حوضه برای چنین هدفی موجود است. همچنین، این تحقیق می‌تواند گامی برای پرداختن به شبیه‌سازی بارش- رواناب با مدل‌های مفهومی در حوضه‌های فرامرزی کشور باشد که در نوع خود از اولین فعالیت‌ها در این خصوص است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این تحقیق بخش علیای حوضه آبریز رودخانه

جدول ۱. داده‌های هیدرومتری و باران‌سنجی در دسترس در حوضه آبریز هیرمند

| منبع | دوره زمانی | نوع داده |
|-----------------------------------|------------|---------------------------|
| دوره زمانی ثبت دبی رودخانه هیرمند | | |
| http://waterdata.usgs.gov | ۱۹۷۹-۱۹۵۲ | ایستگاه دهرآوود |
| http://waterdata.usgs.gov | ۱۹۸۰-۱۹۴۸ | ایستگاه پایین‌دست سد کجکی |
| دوره زمانی ثبت داده‌های هواشناسی | | |
| http://docs.lib.noaa.gov | ۱۹۸۴-۱۹۶۹ | ایستگاه روزانه بارش |
| http://docs.lib.noaa.gov | ۱۹۸۴-۱۹۶۹ | ایستگاه روزانه دما |

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی و متوسط مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناسی

| ارتفاع (متر) | میانگین تابش خورشید (Ratio) | سرعت باد (m/s) | متوسط دما سانتی‌گراد | تبخیر و تعرق (میلی‌متر) | بارندگی (میلی‌متر) | | | عرض جغرافیایی | نام ایستگاه |
|--------------|-----------------------------|----------------|----------------------|-------------------------|--------------------|-------|--------|---------------|-------------|
| | | | | | ماکزیمم | متوسط | مینیمم | | |
| ۲۱۸۳ | ۰/۷۳ | ۳/۱ | ۹/۵ | ۱۳۵۹ | ۵۵۱/۲ | ۲۸۴/۸ | ۹۰/۲ | ۲۵'۶۸ | غزنی |
| ۱۷۹۱ | ۰/۷ | ۱/۷ | ۱۲/۵ | ۱۱۷۳ | ۵۴۷/۸ | ۳۱۶ | ۱۶۴/۹ | ۱۳'۶۹ | کابل |
| ۱۰۱۰ | ۰/۷۸ | ۲/۱ | ۱۹ | ۱۶۴۴ | ۳۱۱/۴ | ۱۶۱/۴ | ۵۷/۳ | ۵۱'۶۵ | قندهار |

مربوط به سازمان‌های بین‌المللی بخصوص USGS و NOAA انجام شد. از مجموع اطلاعات دریافتی، داده‌های اقلیمی از جمله بارش و دمای روزانه تا سال ۱۹۸۴ میلادی توسط سازمان کلیماتولوژی افغانستان منتشر شده که از بخش کتابخانه سایت سازمان NOAA جمع‌آوری شد. اطلاعات هیدرومتری رودخانه نیز در ایستگاه‌های مختلف از دهه ۱۹۴۰ میلادی ثبت گردیده و از سال ۱۹۷۹ میلادی هم‌زمان با تهاجم اتحاد جماهیر شوروی به این کشور متوقف شده است (۲۰) جدول (۱).

در این تحقیق با توجه به محدودیت داده همپوشانی کم زمانی، آمار روزانه سه ایستگاه هواشناسی (جدول ۲) و آمار ماهانه دبی ایستگاه دهرآوود، دوره زمانی ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹ برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل مد نظر قرار گرفت. لازم به ذکر است ایستگاه دهرآوود بعد از تکمیل سد کجکی به پیشنهاد کمیسیون دلتا در ۷۰ کیلومتری بالادست سد کجکی احداث گردید. این محل به‌طوری انتخاب شد که از هر نوع تاثیر برگشت آب سد محفوظ بماند (۲۰).

وسعت مخزن این سد ۱۰۸ کیلومترمربع، ارتفاع آن ۱۰۰ متر و تاج آن به طول ۲۷۵ متر می‌باشد. سد به‌منظور تنظیم آب رودخانه برای کشاورزی و کنترل سیلاب احداث شده و در سال ۱۹۷۵ نیز نیروگاه برق آن با پتانسیل تولید ۱۲۰ مگاوات به‌منظور تأمین برق مورد نیاز جنوب افغانستان بهره‌برداری شده است (۵ و ۱۸).

داده‌های مورد استفاده

داده‌های هواشناسی و هیدرومتری

جمع‌آوری و بررسی داده‌های لازم جهت شبیه‌سازی حوضه یکی از بخش‌های اساسی این تحقیق بوده است. داده‌های زمینی ثبت شده در سراسر افغانستان از جمله در منطقه مطالعاتی این تحقیق کمیاب هستند و با توجه به ملاحظات سیاسی بخشی از اطلاعات موجود نیز غیرقابل دسترس است (۷). در این خصوص هم مراجعات متعددی به وزارت نیرو (دفتر رودخانه‌های مرزی و منابع آب مشترک) و هم سایت‌های

جدول ۳. لایه‌های رقومی در دسترس در حوضه آبریز هیرمند

| منبع | لایه‌های رقومی |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Global U.S. Geological 2000 | لایه رقومی ارتفاع ۹۰ متری افغانستان |
| Afghanistan Information Management Services (AIMS, 1997) | مرز سیاسی کشور افغانستان، استان‌ها، موقعیت شهرها و جاده‌ها |
| http://mapcruzine.com | لایه‌های آبی افغانستان، آبراهه‌ها، کانال‌ها، سدها و دریاچه‌ها |
| Global Land Use Land Cover Characterization (GLCC, 1993) | نقشه کاربری اراضی |
| Global soil map of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 1995) | نقشه خاک |

لایه‌های رقومی مورد استفاده در مدل

در این مطالعه، لایه‌های اطلاعاتی پایه مورد نیاز برای اجرای مدل SWAT برای منطقه به شرح جدول (۳) تهیه شده است. در این خصوص، نقشه DEM (Digital Elevation Model) حوضه اولین لایه اطلاعاتی مورد نیاز می‌باشد که با توجه به وسعت منطقه مطالعاتی از لایه DEM با اندازه سلولی ۹۰ متری استفاده گردید. لایه کاربری اراضی از دیگر اطلاعات مهم است که جهت پیاده کردن الگوی کشت در حوضه لازم می‌باشد. در این راستا لایه رقومی نقشه‌های پوشش گیاهی جهانی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر موارد فوق، نقشه خاک از دیگر لایه‌های مهم است که نقشه سازمان جهانی خواربار مینا قرار گرفت.

مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل جامع در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد که توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا (USDA-ARS) برای پیش‌بینی تأثیر روش‌های مدیریتی متفاوت بر جریان، رسوب، مواد مغذی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی مختلف برای دوره‌های زمانی طولانی ارائه شده است. این مدل نیمه‌توزیعی و با گام زمانی روزانه است. از توانایی‌های آن شبیه‌سازی حوضه‌های بسیار بزرگ یا با مدیریت‌های مختلف و اتصال آن به سیستم‌های GIS می‌باشد.

در این مدل، حوضه به تعدادی زیرحوضه و زیرحوضه‌ها

به تعدادی واحدهای کوچک‌تر (HRU Hydrologic Response Unit) تقسیم می‌شوند. این واحدها تا حد امکان مشابه هستند و دارای ترکیبات یکسانی از خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی می‌باشند. این تقسیم‌بندی، این توانایی را به مدل می‌دهد، تا تفاوت‌های تبخیر و تعرق را برای خاک‌ها و گیاهان مختلف منعکس کند. همچنین رواناب در هر HRU، جداگانه شبیه‌سازی می‌شود و برای تعیین رواناب کل حوضه آبریز، از یکی از دور روش ماسکینگ‌هم و یا ذخیره متغیر (Variable Storage)، روندیابی می‌شود (۱۳). با این عمل، دقت شبیه‌سازی افزایش یافته و توضیح فیزیکی بهتری از معادله تعادل آب، بیان می‌شود. معادله اساسی در مدل، معادله بیلان است که مطابق زیر تعریف شده است (۱۳):

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

در این رابطه، SW آب ذخیره شده در خاک، R_{day} بارش روزانه، Q_{surf} رواناب سطحی، E_a تبخیر و تعرق واقعی، W_{seep} آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع وارد می‌شود و Q_{gw} جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه برحسب میلی‌متر می‌باشد.

شبیه‌سازی برف

در مدل SWAT، بارش به صورت برف و باران، با توجه به دمای متوسط روزانه طبقه‌بندی می‌شود. اگر دمای میانگین روزانه، کمتر از دمای آستانه باشد، بارش در هر HRU به صورت برف در نظر گرفته شده و به برف پشته اضافه

نیکویی برازش و ضریب Br^2 به منظور مقایسه دبی ماهانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای استفاده گردید (۱). مقدار ضریب R^2 (ضریب تبیین) بین صفر تا یک بوده و نشان دهنده همخوانی بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی با استفاده از روش رگرسیونی است. ضریب نش- ساتکلیف (NS) اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و مقدار این فاکتور بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بیشتر از ۵/۰ این فاکتور نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب توسط مدل است. تابع Br^2 نیز بین صفر تا یک تغییر می‌کند. رابطه آنها عبارت است از:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_{obs,i} - \overline{O_{obs}})(O_{sim,i} - \overline{O_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_{obs,i} - \overline{O_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (O_{sim,i} - \overline{O_{sim}})^2} \quad [3]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_{sim} - O_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (O_{obs,i} - \overline{O_{obs}})^2} \quad [4]$$

$$Br^2 = \begin{cases} |R^2| & \text{if } |b| \leq 1 \\ |b|^{-1} R^2 & \text{if } |b| > 1 \end{cases} \quad [5]$$

در روابط (۳) و (۴) مقدار اندازه‌گیری شده رواناب، $\overline{Q_{obs}}$ متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب، $\overline{Q_{sim}}$ شبیه‌سازی شده رواناب، $\overline{Q_{sim}}$ متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب و n تعداد مشاهدات، و در رابطه (۵) ضریب تبیین و b شیب خط رگرسیونی است.

استخراج سطح پوشش برف از تصاویر Landsat

با توجه به برفی بودن حوضه آبریز هیرمند و به منظور ارزیابی شبیه‌سازی‌های مد نظر تحقیق، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سطح پوشش برف با خروجی‌های مدل SWAT گزینه مناسبی خواهد بود. بدین منظور از داده‌های ماهواره Landsat MSS که دارای ۴ باند و قدرت تفکیک مکانی ۸۰ متر می‌باشند، استفاده شد.

الگوریتم طبقه‌بندی حداکثر احتمال

طبقه‌بندی نظارت شده یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تبدیل فضای تصویر به طبقه‌بندی‌های اطلاعات موضوعی است. برای

می‌شود. برف پشته با بارش برف اضافی، افزایش و با ذوب برف یا تصعید، کاهش می‌یابد. تعادل جرم برای برف پشته عبارتست از (۱۳):

$$SNO = SNO + R_{day} - E_{sub} - SNO_{mlt} \quad [2]$$

که در آن میزان آب برف پشته روزانه R_{day} ، (mm)، مقدار بارش روزانه E_{sub} ، (mm)، مقدار تصعید روزانه SNO_{mlt} ، (mm)، مقدار ذوب برف روزانه (mm) می‌باشد.

از مهم‌ترین امکانات مدل SWAT در شبیه‌سازی فرآیند فوق، می‌توان به انتخاب Elevation band اشاره داشت که حوضه را تا ده باند ارتفاعی تقسیم می‌کند و سپس محاسبات برای هر باند بصورت روزانه انجام می‌گردد (۱۳). با این کار، مدل می‌تواند تفاوت‌های پوشش و ذوب برف تحت تغییرات بارش و دما با ارتفاع را در محاسبات با دقت بالاتری اعمال نماید.

واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت:

در این تحقیق از نرم‌افزار SWAT-CUP برای انجام واسنجی مدل استفاده شده است. ایده اولیه این مدل در سال ۱۹۹۷ توسط عباسپور و همکاران ارائه شد و در سال ۲۰۰۷ توسط ایشان توسعه یافت (۴). در نرم‌افزار SWAT-CUP، چهار الگوریتم برای انجام واسنجی استفاده می‌شود، که عبارتند از: MCMC، ParaSol، GLUE، SUFI2. در الگوریتم SUFI2 پارامتر عدم دقت، تمام منابع خطا از قبیل: عدم دقت در متغیرهای سریع، عدم دقت مدل مفهومی، عدم دقت پارامترها و عدم دقت داده‌های اندازه‌گیری را در نظر می‌گیرد (۳). این عمل توسط دو فاکتور P و R انجام می‌گیرد. فاکتور P درصد داده‌های اندازه‌گیری شده در داخل بازه ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی (95PPU) و فاکتور R ، ضخامت این بازه می‌باشند. مقدار تئوری فاکتور P بین صفر تا ۱۰۰٪ و فاکتور R بین صفر تا بی‌نهایت است. بهترین نتایج در شرایطی رخ خواهد داد که فاکتور P برابر ۱ و فاکتور R صفر شود (۴).

علاوه بر دو فاکتور بالا، از ضرایب R^2 و NS برای تعیین

شبیه‌سازی نماید. اطلاعات ورودی مورد نیاز در این مدل در دو حالت کلی به سیستم معرفی می‌شود. اول نقشه‌های DEM، کاربری اراضی و خاک حوضه به مدل معرفی می‌شود. دوم اطلاعاتی است که به صورت فایل‌های dBase (فرمت .dbf) و ASCII (فرمت .txt) وارد مدل می‌شوند (۶). این فایل‌ها حاوی اطلاعات مورد نیاز برای تعریف کاربری اراضی، جنس خاک و همچنین موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشند. در ادامه پارامترهای مربوط به هر کدام از اجزای اصلی مدل شامل پارامترهای گیاهی (Dat)، خاک‌شناسی (Sol)، آب زیرزمینی (Gw)، مدیریتی (Mgt)، رودخانه (Rte) براساس آمار و داده‌های موجود به مدل معرفی شد. مدل SWAT قادر به شبیه‌سازی فرآیندهای گوناگون در سطح حوضه آبریز می‌باشد و برای شبیه‌سازی، ابتدا آن را به چند زیر حوضه تقسیم می‌کند. در این مازول نقشه DEM برای تعیین خصوصیات ارتفاعی حوضه، تقسیم‌بندی حوضه به زیرحوضه‌ها، تعیین مرز حوضه و زیرحوضه‌ها، ترسیم شبکه جریان رودخانه‌ای و تعیین خروجی حوضه آبریز استفاده می‌شود. هر زیرحوضه نیز بسته به میزان تنوع به چند قسمت دیگر به نام واحد هیدرولوژیکی یکسان (HRU) تقسیم می‌شوند. در این مطالعه حوضه به ۱۳ زیر حوضه و ۱۳۸ HRU تقسیم شده است که در شکل ۲ نقشه‌های استفاده شده و نقشه زیرحوضه‌ها قابل مشاهده است.

واسنجی اولیه و تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

قبل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ابتدا با انجام تحلیل حساسیت (با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP) پارامترهایی که تأثیر بیشتری روی دبی خروجی از حوضه داشتند، مشخص شدند. نتایج این تحلیل در جدول ۴ آمده است. در این جدول درجه تأثیر هر کدام از پارامترهای دخیل در شبیه‌سازی دبی خروجی از زیرحوضه‌ها با رتبه و همچنین مقدار p-value و t-stat آنها مشخص می‌باشد. هر پارامتری که مقدار قدر مطلق t-stat بیشتری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به

انجام این مهم، الگوریتم‌های مختلفی وجود دارند که متداول‌ترین آنها عبارتند از: حداقل فاصله، حداکثر احتمال و فاصله ماهالانویز (۱۴). در این تحقیق از الگوریتم حداکثر احتمال برای طبقه‌بندی تصویر به دو کلاس برف و غیر برف استفاده گردید.

الگوریتم حداکثر احتمال یکی از معروف‌ترین روش‌های آماری طبقه‌بندی است که جزء روش‌های پیکسل پایه قرار می‌گیرد. در این طبقه‌بندی، کلاسی به پیکسل مورد نظر انتساب داده می‌شود که بیشترین احتمال تعلق را دارد. معمولاً فرض می‌شود که توزیع احتمال برای هر کلاس به صورت توزیع نرمال چند بعدی است که از قانون توزیع گوسین تبعیت می‌کند. در این روش احتمال یافتن پیکسل متعلق به یک کلاس داده شده w_i در موقعیت x از فضای چند طیفی به وسیله تابع زیر انتخاب می‌شود (۱۴):

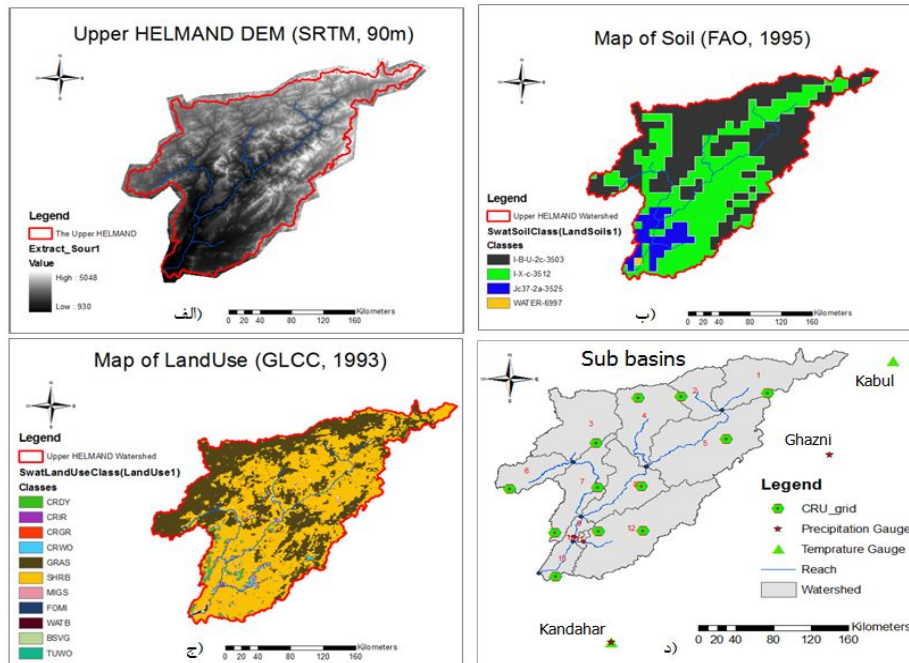
$$\max_{\lambda_1, \dots, \lambda_L} \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \lambda_i y_i(X_i, X_j) y_j \lambda_j + \sum_{i=1}^L \lambda_i \right] \quad [6]$$

که $i=1, 2, 3, \dots$ کلاس‌های پوشش زمین، m_i بردار متوسط داده در کلاس w_i و $|\Sigma|$ ماتریس کواریانس برای هر کلاس است. در عمل، توزیع نرمال چند بعدی به طور کامل به وسیله بردار میانگین و ماتریس کواریانس آن مشخص می‌شود. در تعیین کلاس یک پیکسل به وسیله بردار x از احتمال شرطی $P(w_i|x)$ استفاده می‌شود. با محاسبه $P(w_i|x)$ برای هر پیکسل در تمام کلاس‌ها و مشخص کردن بیشترین مقدار احتمال ثانویه بر حسب پیکسل مشخص می‌شود. اجرای این روش شامل برآورد بردارهای میانگین کلاس و ماتریس‌های کواریانس با استفاده از الگوهای آزمایشی انتخاب شده از نمونه‌های مشخص هر کلاس خاص می‌باشد (۱۴).

نتایج و بحث

آماده سازی مدل SWAT

مدل SWAT برای انجام شبیه‌سازی‌ها، نیاز به یک سری اطلاعات ورودی دارد تا با استفاده از آنها حوضه آبریز را



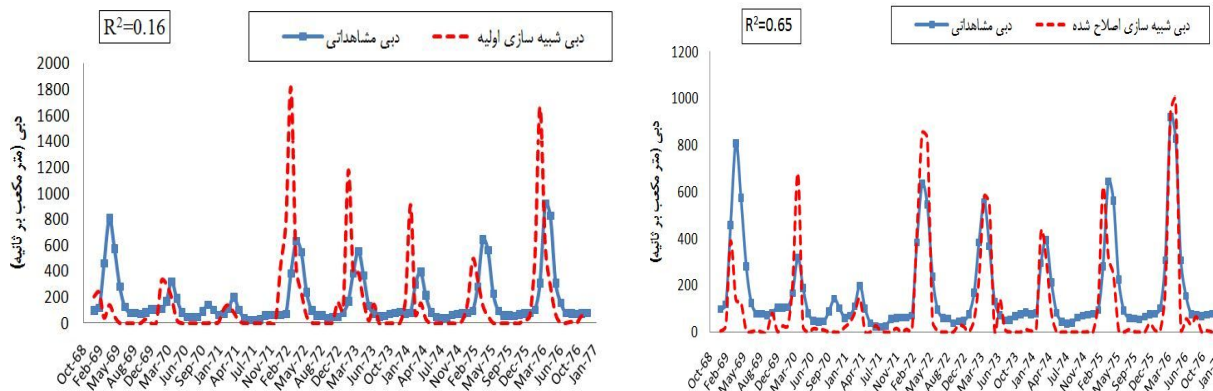
شکل ۲. داده‌ها و لایه‌های ورودی مدل. (الف) نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه (ب) نقشه خاک حوضه (ج) نقشه کاربری اراضی (د) زیرحوضه‌ها، آبراهه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی

جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر t-stat و p-value مربوط به هر کدام از پارامترها

| t-stat | p-value | تعریف پارامتر | نام پارامتر | رتبه حساسیت |
|--------|---------|----------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| ۴/۳۱ | ۰ | ضریب پاسخ جریان پایه در رودخانه - یک بر روز | ALPHA-BNK | ۱ |
| ۲/۸۸ | ۰/۰۱ | شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی | CN2 | ۲ |
| -۲/۴۶ | ۰/۰۲ | ضریب پاسخ جریان پایه - یک بر روز | ALPHA-BF | ۳ |
| ۱/۱۶ | ۰/۲۵ | حداقل دمای لازم برای ذوب برف - درجه سانتی‌گراد | SFTMP | ۴ |
| -۰/۹۹ | ۰/۳۲ | هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی - میلی‌متر در ساعت | SOL-K (1) | ۵ |
| -۰/۷۹ | ۰/۴۳ | حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی - میلی‌متر | GWQMN | ۶ |
| ۰/۷۲ | ۰/۴۷ | هدایت هیدرولیکی موثر در رودخانه اصلی - میلی‌متر در ساعت | CH-K2 | ۷ |
| ۰/۶۸ | -۰/۴۱ | مدت زمان زهکشی لایه‌های خاک بالای سطح ایستابی - روز | GW-DELAY | ۸ |
| -۰/۵۵ | ۰/۵۸ | ضریب جریان تبخیر خاک | ESCO | ۹ |
| ۰/۴۷ | ۰/۶۴ | چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی - گرم در سانتی‌متر مکعب | SOL_BD (1) | ۱۰ |
| -۰/۴۵ | ۰/۶۵ | ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی | GW-REVAP | ۱۱ |
| -۰/۲۷ | ۰/۷۹ | ظرفیت آب قابل دسترس | SOL-AWC (1) | ۱۲ |
| ۰/۲۳ | ۰/۸۲ | ضریب مانینگ رودخانه اصلی | CH-N2 | ۱۳ |

خروجی از حوضه داشته‌اند. این دو پارامتر که به ترتیب پارامترهایی اثرگذار بر رواناب سطحی و میزان مشارکت آب زیرزمینی در کل جریان خروجی از حوضه می‌باشند و

صفر باشد، دارای تأثیری بیشتری بر روی دبی است. جدول ۴ نشان می‌دهد که پارامتر ALPHA در جریان بازگشتی و شماره منحنی CN بیشترین تأثیر را روی دبی



شکل ۳. مقایسه سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده قبل از واسنجی و بعد از واسنجی اولیه در محل ایستگاه دهرآوود

دسامبر)، SMFMX (فاکتور ذوب برف در تاریخ ۲۱ ژوئن) و SMTMP (دمای آستانه ذوب برف) نیز مجدداً در قسمت تحلیل حساسیت نرم‌افزار SWAT-CUP مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب در تحلیل حساسیت مجدداً با ۲۷ پارامتر انجام شد. نتایج جدید حاکی از رتبه بالای این پارامترها و به‌خصوص SMFMX بود (جدول ۵).

براساس همین نتایج فوق و پس از اجرای مدل در تعداد دفعات زیاد و انتخاب بهترین حدود برای پارامترهای مذکور نتایج مطلوبی برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT به‌دست آمد که در جدول ۵ قابل ملاحظه هستند. همچنین همان‌طور که در گراف‌ها قابل ملاحظه است، در دوره اعتبارسنجی به‌خصوص در ماه‌های ژوئن و ژولای ۱۹۷۸، شبیه‌سازی رواناب به‌درستی برآورد نشده است. این اختلاف می‌تواند ناشی از رخدادهای بارش خاص در ایستگاه غزنی واقع در حوضه ارغنداب نسبت به رخدادهای بارش در حوضه بالادست هیرمند باشد که همان‌طور که قبلاً بیان شد، به‌دلیل عدم وجود ایستگاه زمینی در زیرحوضه هیرمند، از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه موجود یعنی ایستگاه غزنی به‌عنوان ورودی داده‌های اقلیمی مدل استفاده شده است.

سایر پارامترها براساس میزان حساسیت و تأثیرگذاریشان در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت.

در ادامه واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز برای دو دوره به‌ترتیب شامل سال‌های ۱۹۷۶-۱۹۶۹ و سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۷۹ به انجام رسید. نتایج اولیه‌ی مدل براساس پارامترهای پیش فرض، ضریب NASH را ۰/۰۸ و R^2 را در حدود ۰/۱ نشان داد. سپس با توجه به نتایج تحلیل حساسیت انجام شده و بررسی محدوده تغییرات تک تک پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی، نتایج رضایت‌بخش‌تری حاصل شد، به‌طوری‌که ضریب NASH به ۰/۴۳ و R^2 به ۰/۶۵ در طول دوره واسنجی ارتقاء یافت. نتایج این بخش در شکل (۳) قابل ملاحظه است. مشاهده می‌گردد که علی‌رغم بهتر شدن معیارهای آماری، شبیه‌سازی دبی پایه به‌خوبی انجام نشده است. بررسی جزئی‌تر خروجی‌های مدل نشان داده که بخش برف آن نیاز به‌کار بیشتری دارد که در بخش بعد به آن پرداخته شده است.

واسنجی و تحلیل حساسیت مدل با توجه به پارامترهای برف
مدل SWAT برای تقویت شبیه‌سازی برف تسهیلاتی را با عنوان Elevation-Band در خود جای داده است. بدین‌منظور می‌توان محدوده ارتفاعی هریک از زیرحوضه‌ها را تا ۱۰ بازه تقسیم و ارتفاع متوسط هر زیرحوضه را به همراه سهم مساحتی هر باندها به مدل معرفی نمود. علاوه بر آن تعدادی از پارامترهای مربوط به برف مانند SMFMN (فاکتور ذوب برف در تاریخ ۲۱

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت پارامترها

| رتبه | نام پارامتر | t-Stat | P-Value |
|------|-------------------|--------|---------|
| ۱ | r_CN2.mgt | -۱۳/۷ | ۰ |
| ۲ | v_SMFMX.bsn | -۴/۴۴ | ۰ |
| ۳ | v_ALPHA_BF.gw | -۳/۸۸ | ۰ |
| ۴ | v_CH_N2.rte | ۲/۶۸ | ۰/۰۱ |
| ۵ | r_SOL_ALB (1).sol | ۲/۰۹- | ۰/۰۴ |
| ۶ | v_PRF.bsn | ۱/۹۳- | ۰/۰۵ |
| ۷ | v_MSK_CO1.bsn | ۱/۶۷ | ۰/۰۹ |
| ۸ | v_OV_N.hru | ۱/۴۵ | ۰/۱۵ |
| ۹ | v_TIMP.bsn | ۱/۳۵- | ۰/۱۸ |
| ۱۰ | v_MSK_CO2.bsn | ۱/۳۳ | ۰/۱۷ |
| ۱۱ | v_REVAPMN.gw | ۱/۰۴- | ۰/۳۰ |
| ۱۲ | v_CH_K2.rte | ۰/۸۶- | ۰/۳۹ |
| ۱۳ | r_SOL_K (1).sol | ۰/۸۲- | ۰/۴۲ |
| ۱۴ | v_GW_DELAY.gw | ۰/۷۳ | ۰/۴۷ |
| ۱۵ | v_SURLAG.bsn | ۰/۶۴ | ۰/۵۲ |
| ۱۶ | v_SPCON.bsn | ۰/۶۳ | ۰/۵۳ |
| ۱۷ | v_EPCO.hru | ۰/۵۹- | ۰/۵۵ |
| ۱۸ | r_SOL_BD (1).sol | ۰/۳۶ | ۰/۷۲ |
| ۱۹ | v_GW_REVAP.gw | ۰/۳۶- | ۰/۷۲ |
| ۲۰ | v_SMTMP.bsn | ۰/۳۵ | ۰/۷۳ |
| ۲۱ | v_SHALLST.gw | ۰/۲۸ | ۰/۷۸ |
| ۲۲ | v_SLSUBBSN.hru | ۰/۲۴ | ۰/۸۱ |
| ۲۳ | v_RCHRG_DP.gw | ۰/۱۹- | ۰/۸۴ |
| ۲۴ | v_SFTMP.bsn | ۰/۱۸ | ۰/۸۶ |
| ۲۵ | r_SOL_AWC (1).sol | ۰/۱۶ | ۰/۸۷ |
| ۲۶ | v_SMFMN.bsn | ۰/۱۲ | ۰/۹۱ |
| ۲۷ | v_ESCO.hru | ۰/۰۴- | ۰/۹۷ |

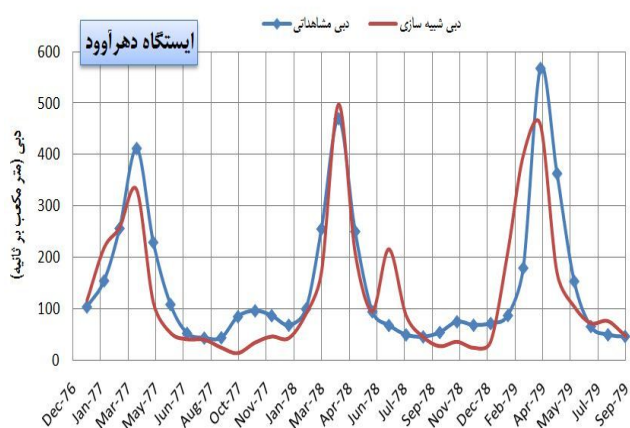
ارزیابی مدل در شبیه‌سازی برف

این تحقیق سعی شد با توجه به این‌که منطقه بالادست هیرمند برفی می‌باشد (۱۰)، صحت‌سنجی‌هایی از این منظر نیز صورت گیرد. به‌همین جهت از تصاویر ماهواره‌ای که سطح پوشش برف را مشخص می‌کند، استفاده شد.

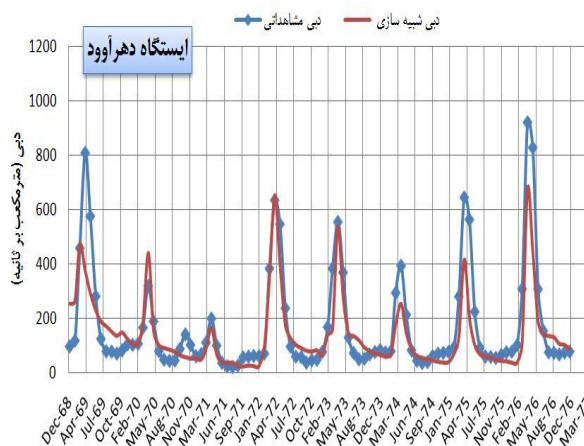
اصولاً ضعف اغلب واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی در آن است که به‌دلیل وجود تنها مشاهدات آب‌سنجی، صحت‌سنجی نتایج تنها روی دبی خروجی از حوضه متمرکز می‌شود. اما در

جدول ۶. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای ایستگاه دهرآوود در دوره آماری مربوطه

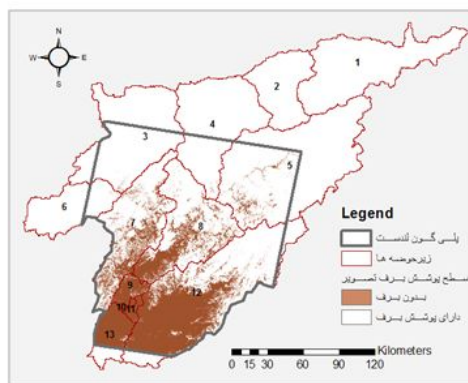
| اعتبارسنجی | | | | واسنجی | | | نام ایستگاه |
|------------|------|----------------|------------|-----------------|------|----------------|-------------|
| Br | NS | R ² | دوره آماری | Br ² | NS | R ² | دوره آماری |
| ۰/۵۷ | ۰/۵۷ | ۰/۷۰ | ۱۹۷۷-۱۹۷۹ | ۰/۴۶ | ۰/۷۱ | ۰/۷۶ | ۱۹۶۹-۱۹۷۶ |



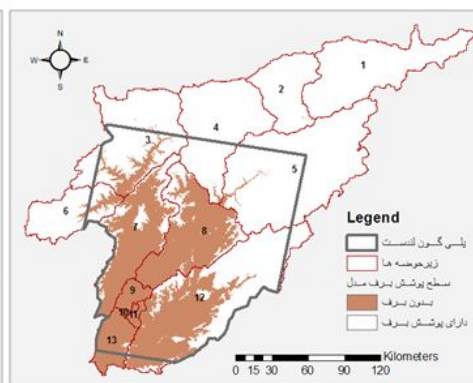
شکل ۵. مقایسه سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده برای دوره اعتبارسنجی در ایستگاه دهرآوود



شکل ۴. مقایسه سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده برای دوره واسنجی در ایستگاه دهرآوود



(ب)



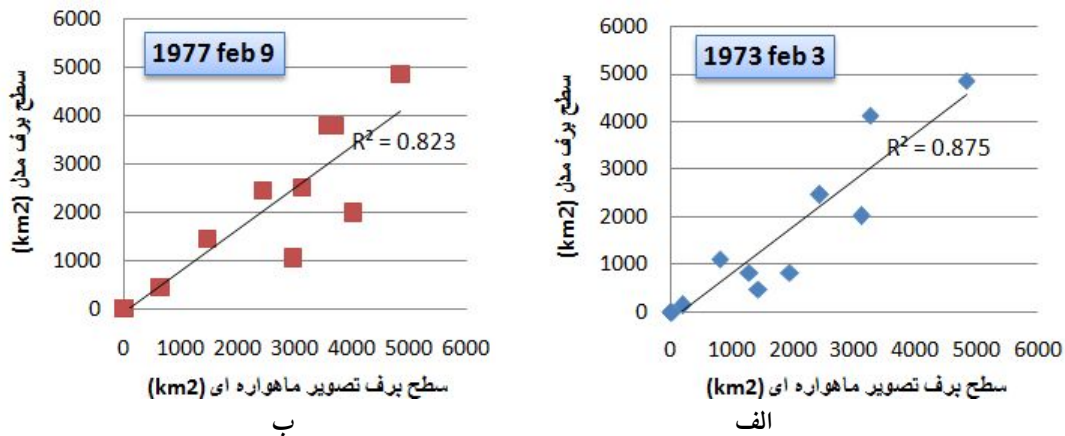
(الف)

شکل ۶. الف) توزیع مکانی برف شبیه سازی شده توسط مدل و ب) مقایسه آن با تصویر ماهواره ای (۳ فوریه ۱۹۷۷)

را پوشش نمی دهد، ولی بخش عمده ای که در تصویر قرار نمی گیرد مربوط می شود به ارتفاعات بالاتر شمال غرب حوضه که در این روز حتماً برفی بوده اند (شکل ۶ ب).

در ادامه، نقشه پراکندگی پوشش برف با استفاده از مقدار متغیر SnowPack مدل SWAT (فایل file.cio) در باندهای ارتفاعی زیرحوضه های مختلف تولید و با سطح پوشش برف

با توجه به دوره آماری تحقیق (۱۹۶۹-۱۹۷۹ میلادی) تنها تصویر ماهواره ای موجود مربوط به ماهواره Landsat 1-3 MSS است. بررسی آرشیو این تصاویر برای منطقه مطالعاتی، تنها دو تصویر را برای روزهای ۳ فوریه ۱۹۷۳ و ۹ فوریه ۱۹۷۷ میلادی نتیجه داد که هم حوضه پوشیده از برف باشد و هم ابرناکی زیادی نداشته باشد. البته سین تهیه شده تمامی حوضه



شکل ۷. مقادیر رگرسیون سطوح برف شبیه‌سازی مدل SWAT و سطوح برفی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای

قرار گرفت. در راستای اهداف این تحقیق، نتایج زیر قابل ارائه می‌باشند:

نتایج نشان داد که مدل SWAT توانایی لازم را در شبیه‌سازی این حوضه را دارا است. و به‌خصوص امکان باند ارتفاعی آن (Elevation-Band) نقش موثری در ارتقاء شبیه‌سازی‌های آن طی جریان‌های پایه داشت. نتایج نهایی نشان داد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه در مرحله واسنجی با استفاده از معیارهای R^2 و NS در خروجی حوضه به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۷۱ و در مرحله اعتبارسنجی ۰/۷۰ و ۰/۵۷ بوده است که از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است.

از دیگر اقداماتی که برای ارزیابی مدل انجام شد، بررسی سطح پوشش برف بود. در این خصوص دو تصویر ماهواره‌های مربوط به روزهای ۳ فوریه ۱۹۷۳ و ۹ فوریه ۱۹۷۹ متعلق به ماهواره Landsat تهیه و سپس سطح پوشش برف در ۱۳ زیرحوضه منطقه مطالعاتی به تفکیک با مدل و تصاویر با هم مقایسه شدند. نتایج از انطباق بسیار مناسبی برخوردار و ضریب همبستگی بالای ۰/۸ را به همراه داشت.

بدیهی است که در شبیه‌سازی حوضه‌های فرامرزی، تأمین داده و اطلاعات از مهم‌ترین و جدی‌ترین محدودیت‌ها می‌باشد. به‌خصوص برای استفاده از مدلی مانند SWAT که بالنسبه داده‌های زیادی را می‌خواهد و کار در حوضه‌های افغانستان مشکل را نیز تشدید می‌کند. اقداماتی که در این خصوص برای

استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مقایسه گردید. به‌منظور تولید نقشه برف مدل در محیط GIS، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع منطقه و محدوده باندهای ارتفاعی، هر زیرحوضه به ۱۰ باند ارتفاعی تقسیم و مقادیر برف برحسب میلی‌متر تعریف و باندهای ارتفاعی برفی و غیربرفی کدگذاری و نقشه پلی‌گون‌های برف به‌صورت کدگذاری شده تهیه گردید. پس از تهیه نقشه برف‌ها، این نقشه‌ها با یک سیستم مختصات و زمین مرجع واحد، به نقشه رستری تبدیل شد (شکل ۶ الف)).

بدین ترتیب میزان سطح پوشش برف در روزهای ۳ فوریه ۱۹۷۳ و ۹ فوریه ۱۹۷۷، برای هریک از زیر حوضه‌های ۱۳ گانه منطقه مطالعاتی، توسط تصاویر و SWAT برآورد گردید. مقایسه ارقام حاصل از دو روش، به‌صورت نمودار پراکنندگی در شکل ۷ الف) و ب) قابل مشاهده هستند. ملاحظه می‌گردد که نتایج مثبت ضریب همبستگی برابر ۰/۸۷ و ۰/۸۲ برای سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۷ به‌دست آمده است.

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل‌های مفهومی با توان شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی به انجام رسید و به‌دلیل چالش‌های دیرینه در حوضه هیرمند، بخشی از این حوضه تا سد کجکی به‌عنوان منطقه مطالعاتی تعیین گردید. بدین منظور مدل SWAT مورد استفاده و ارزیابی

این تحقیق انجام شد، نشان داد که می‌توان چنین شرایطی را عبور کرد و نتایج قابل قبولی به‌دست آورد.

منابع مورد استفاده

۱. اخوان، س. عابدی کویایی، ج. موسوی، س. ف. عباسپور، ک. افیونی، م. اسلامیان، س. س. ۱۳۸۹. تخمین آب آبی و آب سبز با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز همدان- بهار، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳.
۲. تجریشی، م. ۱۳۸۲. پروژه رودخانه‌های مرزی- حوضه آبریز هیرمند. دفتر مطالعات آب و محیط زیست (EWRC)، دانشگاه صنعتی شریف. ۳۴۰ صفحه.
۳. علی‌زاده، ج. ۱۳۸۳. هیدروپلیتیک هیرمند و تأثیر آن بر روابط سیاسی ایران و افغانستان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد.
4. Abbaspour, K. C. 2007. User Manual for SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland, 95 p.
5. Acres International Corporation Amherst, New York. 2004. Kajakai Hydroelectric Project Condition Assessment Dam Safety Assessment Report
6. Arnold, J. G. J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. H Williams, E. B. aney, S. L. Neitsch. 2011. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation: Version 2009.
7. Carrie, M. V. 2011. Assessing the Accuracy of Passive Microwave Estimates of Snow Water Equivalent in Data-Scarce Regions for Use in Water Resource Applications. ERDC-CRREL TR-11-8.
8. Carrie, M. V. J. M. Jacobs. 2011. Snowpack and runoff generation using AMSR-E passive microwave observations in the Upper Helmand Watershed, Afghanistan. Remote Sensing of Environment 115: 3313-3321.
9. Fadil, A. H. Rhinane, A. Kaoukaya, Y. Kharchaf, O. Alami Bachir. 2011. Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. J. of Geographic Information System 3. 279-289.
10. Favre, R. G. M. Kamal. 2004. Watershed atlas of Afghanistan: Working document for planners, 1st Edition. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
11. Harza. 1976. Kajakai Gates Project, probable maximum flood. Civil design memorandum C-1912C. Harza Overseas Engineering Company, Chicago, IL.
12. NCD. 2010. Climatology for Southwest Asia. National Climatic Data Center.
13. Neitsch, S.L. Arnold, J.G. Kiniry, J.R. Williams, J.R. 2009. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version.
14. Richards, J. A. 1995. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction 2nd, Springer, ISBN 0-387-5480-8.
15. Rossi, C. G. R. Srinivasan, K. Jirayoot, T. Le Duc, P. Souvannabouth, N. Binh, P.W. Gassman. 2009. Hydrologic evaluation of the lower Mekong River Basin with the Soil and Water Assessment Tool model. International Agricultural Eng J. 18(1-2):1-13.
16. Schuol, J. K. C. Abbaspour. 2007. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. J. of ecological modelling 20 1, 301-311
17. Schuol, J. K.C. Abbaspour, H. Yang, R. Srinivasan, J. Alexander, B. Zehnder. 2008. Modeling blue and green water availability in Africa. Journal of WATER RESOURCES RESEARCH, Vol. 44, W07406, doi:10.1029/2007WR006609.
18. USACE. 2007. Water balance and regulation alternative analysis for Kajakai Reservoir using HEC-ResSim. PR-63, U.S. Army Corps of Engineers.
19. USGS. 2007. Water balance simulations of runoff and reservoir storage for the Upper Helmand Watershed and Kajakai Reservoir, Central Afghanistan. Prepared for U.S. Agency for International Development.
20. Williams-Sether, T. 2008. Streamflow characteristics of streams in the Helmand Basin, Afghanistan. Data Series 333, U.S. Geological Survey.