



Assessment of changes in hydro-meteorological variables upstream of Helmand Basin during the last century using CRU data and SWAT model

H. Hajihoseini¹, M. Hajihoseini¹,
A. Najafi², S. Morid^{3*} and M. Delavar⁴

Abstract

Helmand River basin upstream Kakakai dam (Afghanistan), has a considerable role in its annual water yield. In order to deal with the ever going water conflict between Iran and Afghanistan, the knowledge about this basin's long term hydro-meteorological conditions can be a useful measure for exploitation of the basin's water resources. It is obvious that such an evaluation needs long term data that is a serious obstacle in Afghanistan due to the poor hydro-infrastructures. For such region with serious scarcity of data, application of the global databases and rainfall-runoff models can be a good alternative. The CRU database is one of these databases with relevant temporal and spatial resolution, which contains these climate data since 1901. SWAT model is also a well know rainfall-runoff model that has been applied for a few trans-boundary basins. Nevertheless, any application of CRU data and SWAT needs pre-assessments, which construct the main objectives of this research work. For this, the paper compared CRU data with the observed data of 17 meteorological stations in Afghanistan that resulted 313 mm compared to 323 mm as annual precipitation for the study area (the upper Helmand). The next step relates to calibration and validation of SWAT, which were done by a limited observed discharge data (1969 to 1979). Furthermore, the model was run using measured and CRU climate data, which the latter performed better. The results of SWAT for the entire period of CRU data set (1913-2012) revealed that there is heterogeneity between the time series before and after 1940, such that the annual rainfall decreases and annual temperature increases. Same behavior was seen for the time series of discharges and its annual average of discharges decreases from 8.1 BMC to 6.07 BMC for the same period. One of the considerable points of this research work is its methodology that can be applied for other transboundary river basins.

Keywords: Rainfall-runoff Model, SWAT Model, Transboundary river basin, CRU, The upper Helmand basin-Afghanistan.

Received: December 11, 2013

Accepted: November 25, 2014

ارزیابی تغییرات متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در بالادست حوضه هیرمند طی سده گذشته با استفاده از داده‌های اقلیمی CRU و مدل SWAT

حمیدرضا حاجی حسینی^۱، محمدرضا حاجی حسینی^۱،
علیرضا نجفی^۲، سعید مرید^{۳*} و مجید دلاور^۴

چکیده

با توجه به نقش بالادست رودخانه هیرمند قبل از سد کجکی در آورد این رودخانه، شناخت هیدرولوژیکی آن و بخصوص در بلند مدت می‌تواند در بهره‌برداری از منابع آب آن که همواره محل اختلاف ایران و افغانستان بوده، مفید باشد. بدیهی است که برای چنین ارزیابی‌هایی، وجود داده‌های بلند مدت همواره مانعی جدی خواهد بود که در افغانستان این مشکل بیشتر نقش آفرینی می‌کند. برای حل این مشکل، استفاده از داده‌های جهانی و مدل‌های بارش-رواناب می‌تواند گزینه مناسبی باشد. پایگاه اطلاعات اقلیمی CRU از جمله پایگاه‌هایی است که این اطلاعات را با قدرت تفکیک مکانی و زمانی نسبتاً مناسبی را از سال ۱۹۰۱ دارا می‌باشد. مدل SWAT هم می‌تواند برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب مورد توجه قرار گیرد که سابقه آن برای حوضه‌های فرامرزی موجود است. اما در هر حال ارزیابی این دو، قبل از هرگونه استفاده عملیاتی لازم خواهد بود. مجموع موارد فوق هدف این مقاله را رقم می‌زنند که نهایتاً بتوان ارزیابی از تغییرات آورد رودخانه هیرمند تا محل سد طی یک صد سال اخیر داشته باشد. بدین منظور، ابتدا داده‌های CRU با استفاده از ۱۷ ایستگاه هواشناسی زمینی در کشور افغانستان مقایسه و مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج، به ترتیب مقدار ۳۱۳ و ۳۲۳ میلی‌متر در سال را نشان داد. برای واسنجی و صحت‌سنجی SWAT، آمار محدودی از ورودی به سد کجکی طی سالهای ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹ تهیه شد. اجرای مدل یکبار با داده‌های اقلیمی مشاهداتی و یکبار با داده‌های CRU انجام شد که نتایج براساس داده‌های CRU عملکرد بهتری داشتند. در ادامه مدل واسنجی شده با داده‌های CRU برای سالهای ۱۹۱۳ الی ۲۰۱۲ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که بین داده‌های دما و بارش CRU طی صد ساله اخیر نوعی ناهمگنی در قبل و بعد از اوائل دهه ۱۹۴۰ وجود دارد. بطوریکه بارش‌ها قبل از این تاریخ بیشتر و دما کمتر می‌باشد. همین رفتار نیز در سری زمانی تولید شده از رواناب ملاحظه گردید و شاهد کاهش میانگین سالیانه حجم از ۸/۱ به ۶/۰۷ میلیارد مترمکعب در محل ورودی به سد کجکی هستیم. از نکات قابل توجه تحقیق، روش‌شناسی آن است که می‌توان برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز فرامزی پیرامون کشور بخوبی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی بارش-رواناب، مدل SWAT، حوضه‌های آبریز مشترک، داده‌های جهانی CRU، حوضه بالادست رودخانه هیرمند-افغانستان.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ آذر ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۴ آذر ۱۳۹۳

1- MSc Student in Water Resources Management, Tarbiat Modares University, Department of Water Resources, Tehran, Iran.

2- Expert of Boundary Rivers and Shared Waters Bureau, Ministry of Energy Tehran, Iran

3- Professor of Tarbiat Modares University of Tehran, Department of Water Resources Management, Tehran, Iran. Email: morid_sa@modares.ac.ir

4- Assist-Professor of Tarbiat Modares University of Tehran, Department of Water Resources Management Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- رئیس گروه مطالعات و برنامه‌ریزی دفتر رودخانه‌های مرزی وزارت نیرو

۳- استاد گروه مهندسی منابع آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۴- استادیار گروه مدیریت منابع آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

۱۹۹۵ انجام گرفت. در نهایت مقادیر مولفه‌های منابع آب شامل آب آبی (مجموع رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی عمیق)، آب سبز (تبخیر و تفرق واقعی) و ذخیره آب سبز (آب خاک) در سطح زیرحوضه‌های این قاره برآورد کردند. (Fadil et al (2011) نیز به منظور 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. آنها به دلیل نبود داده‌های روزانه دما نیز از داده‌های اقلیمی جهانی CRU با قدرت تفکیک مکانی ۵/۰ در ۵/۰ درجه استفاده کردند. در تحقیق دیگری (Akhtar et al (2009) از مدل‌های آب و هوای منطقه‌ای (RCMs)^۳ بعنوان جایگزین داده‌های بارش و دما مورد نیاز مدل هیدرولوژیکی HBV^۴ استفاده کردند. هدف از این تحقیق ارزیابی دو پایگاه داده هواشناسی منطقه‌ای RCM-ERA40 و RCM-HadAM3P در برآورد رواناب شبیه‌سازی شده سه حوضه آبریز هندوکش، کرکروم و هیمالیا در پاکستان بود. در نهایت استفاده از داده‌های اقلیمی جهانی را در مناطق با کمبود داده بعنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی پیشنهاد کردند.

برای بررسی تغییرات ممکن در سری زمانی داده‌ها، روش‌های مختلفی پارامتری و غیرپارامتری هر دو مورد توجه بوده‌اند. اما در بیشتر مطالعات روش‌های غیر پارامتری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مانند (Burn and Elnur (2002)، (Yue et al (2002)، (Kahya، Zhao et al (2010) and Kalayci (2004) که بر روش‌های غیر پارامتریک تأکید داشته‌اند. علت عمده این ترجیح نیز عدم نیاز به پیش‌فرض توزیعی نرمال در استفاده از این روش‌ها می‌باشد (سبزی‌پرور و شادمانی، ۱۳۹۰). فتحیان (۱۳۹۰) مجموعه‌ای از این مطالعات را دسته‌بندی کرده و نشان داد روش من-کنال بیشترین استفاده را برای بررسی روند در سری زمانی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی داشته است.

تلاش‌های مختلفی به منظور بررسی شرایط حوضه هیرمند و بخصوص برآورد پتانسیل آبی حوضه بالادست هیرمند صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعه هیدرولوژیکی (Harza (1976) به منظور تخمین حداکثر سیل محتمل (PMF) در راستای طراحی سرریز سد کجکی اشاره کرد. در تحقیق دیگری تجربی و همکاران (۱۳۸۰) تلاش کردند همبستگی آورد سالیانه رودخانه هیرمند را با تصاویر ماهواره‌ای به تفکیک طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۰ مورد ارزیابی قرار دهند. در این تحقیق حجم آورد رودخانه با سطح پوشش برف طی سالهای ۲۰۰۰-۱۹۸۷ مقایسه شده

ورودی‌های رودخانه هیرمند به کشور، همواره دستخوش تغییرات و عاملی برای مناقشات هیدروپلیتیکی ایران و افغانستان بوده است. یکی از دلایل عنوان شده در این خصوص، تغییر در شرایط آب و هوایی و هیدرولوژی این حوضه می‌باشد (Najafi and Vatanfada, 2011). بدیهی است که برای بررسی این موضوع آمار بلندمدت نیاز می‌باشد که در هیرمند، داده (و آن هم بلندمدت) بشدت با محدودیت مواجه است. در این راستا استفاده از پایگاه‌های داده جهانی که اطلاعات اقلیمی متنوعی را در خود جای داده‌اند، می‌تواند تا حدی راه‌گشا باشد. ضمن اینکه گزارشات مثبتی از آنها نیز در مراجع مختلف قابل مشاهده می‌باشد (Akhtar et al., 2009 ; BITEW et al., 2011; Fadil et al., 2011; Vu et al, 2012). داده‌های CRU^۱ یکی از این منابع است که بیشتر مورد توجه بوده که اطلاعات مربوط به بارش و دما در مقیاس ماهانه را بطور جهانی در خود جای داده است. اما برای اطلاعات رواناب داده‌های مستقیمی وجود ندارد، ولی در مراجع کاربرد داده‌های جهانی مانند CRU و مدل‌های بارش-رواناب مانند SWAT^۲ برای تولید این اطلاعات مورد توجه قرار گرفته شده است. تحقیق Rossi و همکاران (۲۰۰۹) از جمله کاربردهای این مدل به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فرامرزی مکنونگ می‌باشد. 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. کاربردهای بیشتر مدل برای چنین حوضه‌هایی در مرجع (حاج‌حسینی و همکاران، ۱۳۹۲) قابل دسترس می‌باشند.

مشابه اهداف این مقاله، کارهایی با مدل SWAT و داده‌های جهانی به انجام رسیده که از آن میان (Schuol and Abbaspour (2007) قابل ذکر است. آنها داده‌های اقلیمی ماهیانه پایگاه CRU را با الگوریتم نسبتاً ساده DGEN به داده‌های روزانه تبدیل و سپس مدل را برای منطقه‌ای در غرب آفریقا با مساحت ۱۰۰۰۰ کیلومتر مربع اجرا کردند. در تلاش دیگری (Schuol and Abbaspour (2008) به منظور ارزیابی منابع آب شیرین و میزان کمبود آن در سراسر قاره آفریقا، مجدداً مدل SWAT را بکار بردند. در این تحقیق بدلیل 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

افغانستان به ایران (معاهده سال ۱۹۷۳) می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت.

۲- داده‌ها و روش‌شناسی

۲-۱- منطقه مطالعاتی

همانگونه که آمد، منطقه مطالعاتی این تحقیق بخشی علیای حوضه آبریز رودخانه هیرمند تا محل سد کجکی؛ به مساحت حدود ۴۷۰۰۰ کیلومتر مربع و طول حدود ۵۰۰ کیلومتر است (شکل ۱). این رودخانه از کوه‌های بابا یغما با ارتفاعی ۵۱۴۳ متر از سطح دریا و از سلسله کوه‌های هندوکش در شصت کیلومتری غرب کابل سرچشمه می‌گیرد. در پست‌ترین نقطه این بخش نیز سد کجکی در ارتفاع ۱۰۰۰ متری قرار دارد. رودخانه بعد از طی مسافت ۱۰۵۰ کیلومتری به دریاچه هامون در سیستان ایران می‌رسد. متوسط بارندگی سالیانه نیز در این بخش بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر در تغییر می‌باشد (NCDC, 2010).

۲-۲- داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

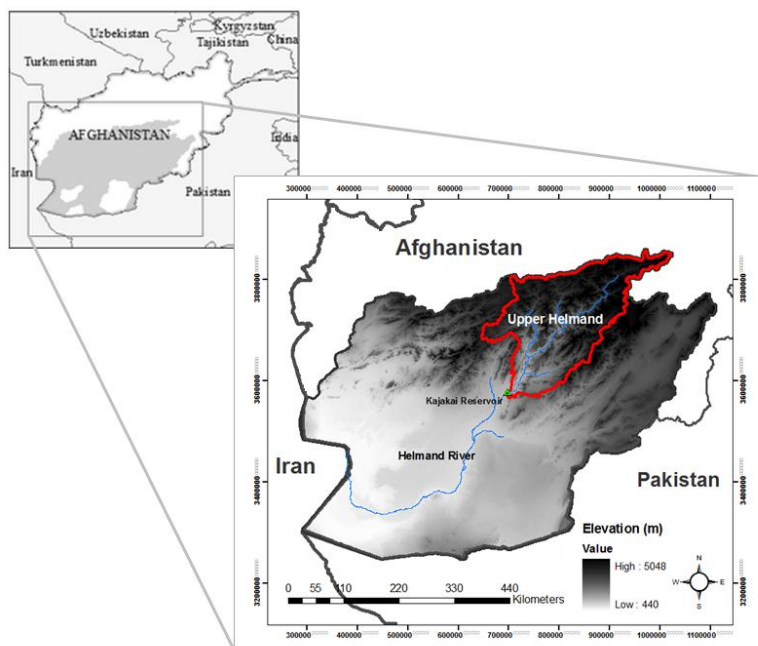
۲-۱-۲- داده‌های هواشناسی و آب‌سنجی

همانگونه که اشاره شد، داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در منطقه مطالعاتی بسیار محدود است و با توجه به ملاحظات سیاسی-امنیتی، بخشی از اطلاعات موجود نیز غیر قابل دسترس هستند (Carrie et al., 2011). از مجموع اطلاعات دریافتی، داده‌های اقلیمی از جمله بارش و دمای روزانه از سال ۱۹۶۹ تا سال ۱۹۸۴ میلادی توسط سازمان کلیماتولوژی افغانستان منتشر شده که از طریق بخش کتابخانه سایت سازمان NOAA^۵ در دسترس قرار گرفت. همچنین برای سال‌های ۱۹۶۱-۱۹۷۷ داده‌های اقلیمی ماهانه که تحت پروژه صلح افغانستان با همکاری وزارت راه افغانستان، USAID^۶ و USDAVIS^۷ جمع‌آوری شده، تهیه و بکار گرفته شد. اندازه‌گیری داده‌های هیدرومتری رودخانه هیرمند نیز در ایستگاه‌های مختلف از دهه ۱۹۴۰ میلادی آغاز و از سال ۱۹۷۹ میلادی همزمان با تهاجم اتحاد جماهیر شوروی به این کشور متوقف شده است (Carrie, M.V. Jacobs, J. M. 2011). با توجه به همپوشانی کم زمانی اطلاعات فوق، نهایتاً از آمار روزانه سه ایستگاه هواشناسی غزنی، کابل و قندهار و آمار ماهانه دبی دهرآوود، دوره زمانی ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹ برای واسنجی و اعتبار سنجی مدل اولیه استفاده شد. اما برای ارزیابی داده‌های جهانی علاوه بر موارد فوق، از آمار ماهانه ۱۱ ایستگاه دیگر در کشور افغانستان، دو ایستگاه زابل و زاهدان (ایران) و ایستگاه دل‌بندین کشور پاکستان طی دوره ۱۹۶۱-۱۹۷۷ میلادی

که در نهایت رابطه میان این سطح و حجم آورد بهاره طی این سالها، ضریب همبستگی ۰/۵۷ را نشان داد. از مطالعات دیگری می‌توان به پروژه مدیریت یکپارچه منابع آب دلتای سیستان ایران اشاره کرد که با همکاری دانشگاه دلف هلند و موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو در سال ۲۰۰۶ به انجام رسیده است (Eelco van Beek et al, 2006). هدف اصلی این تحقیق ارزیابی و شناخت دلتای افغانستان به منظور توسعه روش‌ها و ابزارهایی جهت تقویت مدیریت یکپارچه منابع آب و پشتیبانی از کشاورزی و اکوسیستم منطقه بود. USGS نیز در گزارشی که در سال ۲۰۰۷ منتشر نمود (Vining and Vecchia, 2007)، بیلان آب حوضه بالادست رودخانه هیرمند را بطور مفصل مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. در مطالعه دیگری ارتش ایالات متحده (U.S. Army)، به منظور برورسانی و ارزیابی مجدد تحلیل بیلان آب به منظور بهره‌برداری و برنامه‌ریزی بلندمدت سد کجکی، مدل HEC-ResSim را مورد استفاده قرار دادند (Needham, 2007). همچنین در مطالعه دیگری در سال ۲۰۱۱ که با همکاری ارتش ایالات متحده صورت گرفت، از داده‌های سنجش از دور به منظور برآورد آب معادل برف حوضه بالادست هیرمند کمک گرفته شد. لازم به ذکر است تراز سد کجکی بوسیله ارتباطات شخصی در اختیار این تحقیق قرار گرفته است. داده‌های بارندگی مورد نیاز نیز از پایگاه داده TRMM که مقادیر بارش روزانه از سال ۱۹۹۷ تاکنون را در اختیار قرار می‌دهد، تامین شده است. در این گزارش نتایج ارزیابی پایگاه داده مذکور با استفاده از داده‌های زمینی در یک دوره شش ساله ۲۰۰-۴۰۰ میلیمتر در سال گزارش شده، درحالی‌که پایگاه داده TRMM مقداری کمتر از آن و در حدود ۱۰۰-۳۰۰ میلیمتر در سال را برآورد کرده است. نهایتاً سوابق مطالعاتی گسترده توسط سازمان‌های USGS و همکاری ارتش ایالات متحده از منطقه مطالعاتی، اهمیت منطقه از بعد هیدروپلیتیک را نشان می‌دهد که به مراتب فراتر از تعاملات ایران و افغانستان به نظر می‌آید.

با توجه به این مقدمه، تحقیق حاضر به ارزیابی داده‌های CRU و خروجی رواناب مدل SWAT به عنوان داده‌های جایگزین در حوضه هیرمند می‌پردازد و سپس تعدادی از روش‌های غیرپارامتریک را برای بررسی وقوع تغییرات در این سری‌ها مورد استفاده قرار می‌دهد. لازم به ذکر می‌باشد، با تلاش زیاد اطلاعات محدودی از حوضه هیرمند و افغانستان تهیه شده که برای واسنجی و صحت‌سنجی‌های لازم مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. همچنین برای این مرحله، تنها بخش بالا دست هیرمند که اصلی‌ترین منبع تولید آب در حوضه و مبنای تخصیص آب

نیز استفاده شد. فهرست این ایستگاه‌ها همراه با آدرس اینترنتی آنها در جدول ۱ قابل ملاحظه هستند.



شکل ۱- موقعیت حوضه هیرمند، زیر حوضه بالادست هیرمند و سد کجکی

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری، هواشناسی و متوسط مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناسی

مرجع	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	متوسط بارندگی (میلی متر)	کشور	نام ایستگاه
* , +	۱۲۰۰	۳۷° ۱'	۷۰° ۵'	۵۰/۱/۳	افغانستان	فیض آباد
*	۲۳۵۰	۳۶° ۶'	۶۹° ۲'	۳۱۹/۳	افغانستان	گردیز
* , +	۲۱۸۳	۳۳° ۳۲'	۶۸° ۲۵'	۲۸۴/۸	افغانستان	غزنی
* , +	۹۶۴	۳۴° ۲'	۶۲° ۲'	۲۲۲/۵	افغانستان	هرات
*	۱۶۳۰	۳۳° ۱'	۶۹° ۲'	۱۷۱/۲	افغانستان	جبل سراج
* , +	۱۷۹۱	۳۴° ۳۳'	۶۹° ۱۳'	۳۱۶	افغانستان	کابل
* , +	۱۰۱۰	۳۱° ۳۰'	۶۵° ۵۱'	۱۶۱/۴	افغانستان	قندهار
*	۱۹۰۵	۳۴° ۶'	۶۹° ۰'	۴۰/۱/۰۶	افغانستان	کاریز میر
* , +	۳۷۸	۳۶° ۷'	۶۷° ۲'	۱۸۹/۱	افغانستان	مزار شریف
*	۸۱۵	۳۶° ۹'	۶۵° ۷'	۳۵۲/۶	افغانستان	میامانا
* , +	۳۳۶۶	۳۵° ۹'	۶۹° ۰'	۱۰/۱۸/۵	افغانستان	سلنگ شمالی
*	۲۱۱۴	۳۵° ۳'	۶۸° ۹'	۴۱۹/۶	افغانستان	پغمان
*	۲۷۱۰	۳۴° ۳'	۶۷° ۰'	۲۸۴/۸	افغانستان	پنجاب
*	۱۵۶۵	۳۲° ۱'	۶۶° ۹'	۲۸۱/۳	افغانستان	قلات
++	۴۸۹	۳۱° ۰'	۶۱° ۴'	۶۲/۵	ایران	زایل
++	۱۳۷۰	۲۹° ۴'	۶۰° ۸'	۹۰/۷۹	ایران	زاهدان
++	۸۵۰	۲۸° ۸'	۶۴° ۴'	۸۸/۲۱	پاکستان	دل بندین
**	۱۰۵۷	۳۳° ۴۲'	۶۵° ۲۸'	Y	افغانستان	دهراوود

Y: Streamflow-gaging station

+ NOAA Central Library, National Oceanographic Data Center <http://docs.lib.noaa.gov/rescue>

* AFGHANISTAN PEACE Project, <http://cnrit.tamu.edu>

** U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov/pubprod>

++ The World Meteorological Organization, http://www.wmo.int/pages/index_en.html

جدول ۲- لایه‌های رقومی تهیه شده از حوضه آبریز هیرمند برای مدل SWAT

منبع	لایه‌های رقومی
Global U.S. Geological 2000	لایه رقومی ارتفاع ۹۰ متری افغانستان
Afghanistan Information Management Services(AIMS, 1997) http://mapcruzine.com	مرز سیاسی کشور افغانستان، استان‌ها، موقعیت شهرها و جاده‌ها 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

۲-۲-۲- لایه‌های رقومی

زنجیره مارکف و توزیع گاما است، بطوریکه براساس پارامترهای بارش ماهانه، تعداد روزهای مرطوب در ماه و میانگین حداقل و حداکثر دمای ماهانه، سری زمانی روزانه را تولید می‌کند (Schuol and Abbaspour, 2007).

متناسب با نیاز اطلاعاتی مدل SWAT، لایه‌های رقومی DEM^۱ با اندازه سلولی ۹۰ متری^۲، کاربری اراضی و پوشش گیاهی جهانی^{۱۰} و نقشه خاک سازمان جهانی خواربار^{۱۱} برای منطقه مطالعاتی تهیه شد (جدول ۲).

۲-۴- مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل جامع در مقیاس حوضه‌ای می‌باشد که توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا (USDA-ARS) برای پیش‌بینی تاثیر 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 نیمه توزیعی و با گام زمانی روزانه است. از توانایی‌های آن شبیه‌سازی حوضه‌های بسیار بزرگ یا با مدیریت‌های مختلف و اتصال آن به سیستم‌های GIS می‌باشد (Arnold et al, 2009).

۲-۳- داده‌های اقلیمی جهانی CRU

مدل CRU یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی است و از حداکثر داده‌های هواشناسی زمینی ثبت شده در سطح جهان بهره می‌برد. شمار ایستگاه‌های مورد استفاده در آن متغیر بوده، بطوریکه برای سال‌های اولیه این داده‌ها (۱۹۰۱)، شمار ایستگاه‌هایی که در تولید این پایگاه داده به کار رفته ۴۹۵۷ ایستگاه و در سال ۱۹۸۱ به ۱۴۵۷۲ ایستگاه افزایش یافته است (Harris et al., 2014). پایگاه داده CRU علاوه بر قدرت تفکیک مکانی بالا، دوره زمانی بلند مدت‌تری را نسبت به سایر داده‌های جهانی پوشش می‌دهد. به همین دلیل در بسیاری از مطالعات این داده‌ها به‌عنوان داده‌های مشاهداتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ایران‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۸). این داده‌ها در دانشگاه ایست آنجلیا^{۱۲} (بریتانیا) تهیه و در دسترس قرار می‌گیرد.

در این مدل، حوضه به تعدادی زیرحوضه و زیرحوضه‌ها به واحدهای کوچکتر HRU (Hydrologic Response Unit) تقسیم می‌شوند. این واحدها تا حد امکان دارای ترکیبات یکسانی از خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی می‌باشند. تقسیم بندی فوق این توانایی را به مدل می‌دهد، تا تفاوت‌های مدیریتی را بتوان به مدل منعکس و خروجی‌ها را متناسب با آن دریافت نمود. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز توسط مدل SWAT در دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله اول یا فاز زمین^{۱۳}، کنترل کننده مقدار ورودی آب، رسوب و مواد مغذی از هر زیرحوضه به داخل مجاری زهکش اصلی است، که در بخش بعد به روابط حاکم بر آنها اشاره خواهد شد. مرحله دوم شامل روندیابی^{۱۴} و حرکت آب، رسوب و مواد مغذی از شبکه‌های زهکش حوضه تا خروجی آن می‌باشد که برای تعیین رواناب خروجی حوضه در این مدل، روش‌های ماسکینگ‌هام یا ذخیره متغیر^{۱۵} استفاده می‌شوند.

نسخه مورد استفاده در این تحقیق با تفکیک مکانی ۰/۵ در ۰/۵ درجه جغرافیایی و در مقیاس ماهانه و برای بازه ی زمانی ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۲ میلادی (CRU TS v3.21 datasets, 2013) می‌باشد (Mitchell et al., 2005). این نسخه پارامترهای مختلفی را دارا است که از جمله می‌توان به بارش ماهیانه (pre)، تعداد روزهای مرطوب (wet)، میانگین حداقل دما (tmn)، میانگین حداکثر دما (tmx)، پوشش ابر (cld)، پتانسیل تبخیر و تعرق (pet)، فشار بخار هوا (vap) اشاره کرد (New et al 2002). از مجموع این داده‌ها، مقادیر مربوط به بارش ماهیانه، تعداد روزهای مرطوب در ماه و میانگین حداقل و حداکثر دمای هوا برای اجرای مدل SWAT استفاده شد. البته مدل این داده‌ها را بطور روزانه نیاز دارد که بدین منظور از الگوریتم dGen-CRU استفاده شد. این روش براساس

معادله اساسی در مدل، معادله بیلان است که مطابق زیر تعریف شده است (Neitsch et al, 2009):

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

در روابط (۲) و (۳) مقدار اندازه‌گیری شده رواناب، Q_{obs} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب، Q_{sim} مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب، Q_{sim} متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده رواناب و n تعداد مشاهدات است.

۲-۶- آزمون‌های غیر پارامتریک

بررسی داده‌های اقلیمی CRU و تغییراتی که در سری زمانی آنها ملاحظه شد، ضرورت بررسی روند و همگنی را در آنها نشان داد. بدین منظور برای روند، دو آزمون Spearman، Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) و برای همگنی، آزمون Man-Whitney (Kendal, 1975; Pilon et al., 1985) مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از دو آزمون برای روند بنا به توصیه (Kahya & Kalayci, 2004) می‌باشد. شرح کامل این روش‌ها در مرجع فتحیان (۱۳۹۰) قابل دسترس می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی داده‌های بارندگی CRU

برای ارزیابی داده‌های CRU برای منطقه مطالعاتی، ابتدا به دلیل تراکم کم ایستگاه‌ها و دوره زمانی کوتاه آنها، لازم شد تا تمامی آمار در دسترس ایستگاه‌های موجود در افغانستان و حتی تعدادی ایستگاه در ایران و افغانستان مورد استفاده قرار گیرد (جدول ۲). جهت تشریح بهتر، موقعیت این ایستگاه‌ها و شبکه داده‌های CRU نیز در شکل ۲ قابل ملاحظه هستند.

برای ارزیابی‌های لازم ابتدا نقشه‌های همبارش ماهانه و سالانه با استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی و همچنین شبکه ۰/۵ در ۰/۵ داده‌های CRU برای کل منطقه افغانستان تهیه شد. لازم به ذکر است برای درون‌یابی روش‌های IDW، Kriging و Spline مورد بررسی و نهایتاً بدلیل درون‌یابی مکانی بهتر روش کریجینگ در مقایسه با نقشه همبارش مربوط به اطلس سال ۲۰۰۴ افغانستان (Favre, 2004)، این روش مورد استفاده قرار گرفت. نقشه همباران سالانه افغانستان در دوره زمانی مشترک ۱۹۶۱-۱۹۷۷ براساس این دو سری داده در شکل ۳ آمده است.

(۱) $\Delta SW = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$ در این رابطه، ΔSW 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.

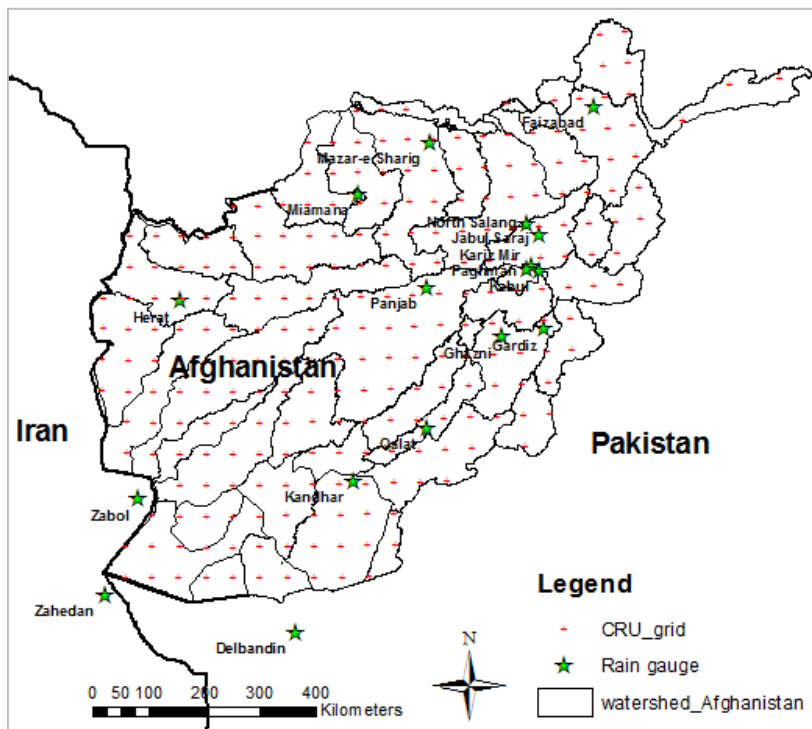
در مدل SWAT دو روش برای تخمین حجم رواناب سطحی وجود دارد که شامل روش شماره منحنی SCS و روش معادله نفوذ Green&Ampt می‌باشد. روش اول، تجربی است و بوسیله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) برای تخمین مقدار رواناب در حوضه با کاربری اراضی و خاک‌های مختلف توسعه پیدا کرده است. در این تحقیق از روش شماره منحنی SCS برای محاسبه حجم رواناب سطحی حوضه استفاده گردید که روابط مورد استفاده در این روش در مرجع (Neitsch et al, 2009) قابل دسترس می‌باشند.

۲-۵- واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت

نظر به وجود پارامترهای متعدد در SWAT، واسنجی آن بخشی از چالش‌های پیش رو در آماده‌سازی مدل است. بدین منظور از نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی استفاده شد. در این نرم‌افزار، چهار الگوریتم برای انجام واسنجی استفاده می‌شود که عبارتند از: GLUE، ParaSol، MCMC (Abbaspour, 2007) و SUFI2. 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 ۰-۱۰۰٪ 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 (Bitew et al., 2011).

علاوه بر دو فاکتور بالا، از ضرایب R^2 و NS برای تعیین نکویی برازش استفاده می‌شود. مقدار ضریب R^2 (ضریب تبیین) بین صفر تا یک بوده و نشان‌دهنده 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 ۰/۵ این فاکتور نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب توسط مدل است. رابطه آنها عبارت است از:

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



شکل ۲- شبکه داده‌های پایگاه CRU و موقعیت ۱۷ ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده

شود، این CRU از ارقام مشاهداتی کمتری برای تدقیق مدل خود برخوردار بوده است. براساس آزمون من-کندال روند در دوره ۱۹۱۳ تا ۲۰۱۲ در سطح ۰/۱ معنی‌دار است، ولی چنانچه این ارزیابی برای دوره ۱۹۴۱-۲۰۱۲ انجام گردد، معنی‌دار نخواهد بود.

۳-۲- ارزیابی داده‌های دمای CRU

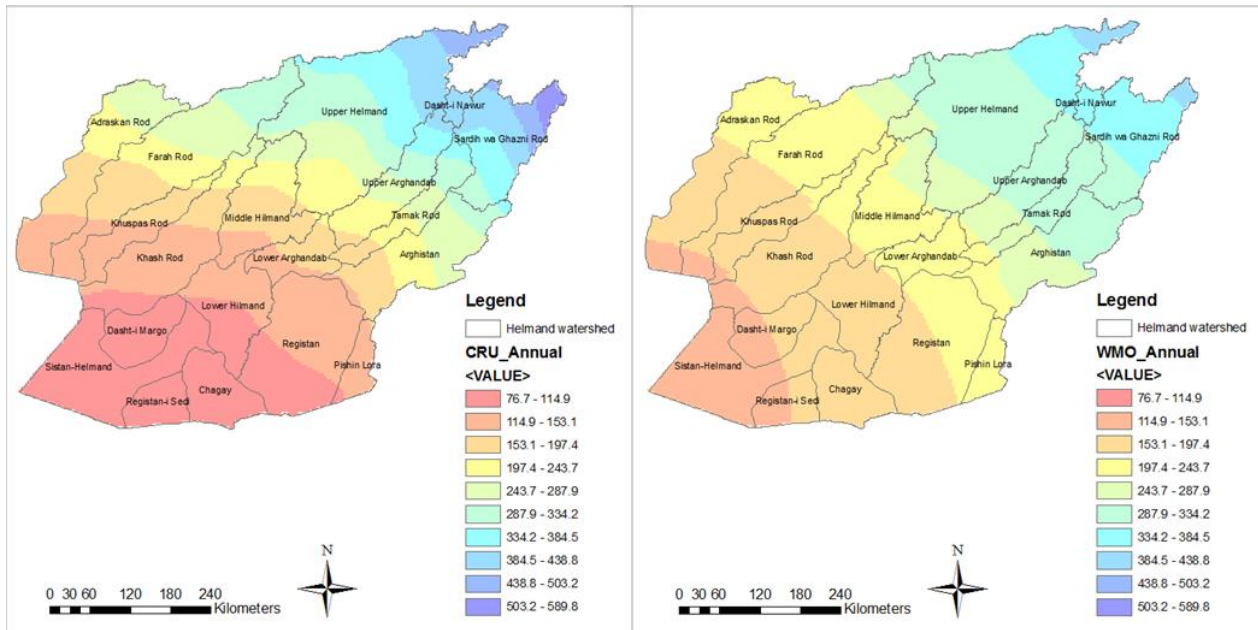
برای ارزیابی داده‌های دمای CRU، آمار در دسترس تنها ایستگاه موجود در حوضه بالادست هیرمند (پنجاب، جدول ۲) می‌باشد. بدین منظور با استفاده از روش IDW و براساس نقطه‌های شبکه CRU در اطراف این ایستگاه، مقادیر دمای حداقل و حداکثر ماهانه برای سالهای ۱۹۶۵-۱۹۷۷ (دوره مشترک با داده‌های موجود ایستگاه پنجاب)، درون‌یابی و مقایسه شد. میانگین بلندمدت سالانه دما در این ایستگاه براساس دو پایگاه داده CRU و مشاهداتی، به ترتیب ۴/۸۶ و ۳/۷۸ درجه سانتیگراد برآورد شد. توزیع ماهیانه دمای حداکثر و حداقل نیز طی این دوره با استفاده از دو منبع داده برآورد و در شکل ۶ ارائه شده‌اند. همانطور که در شکل مشخص می‌باشد، توزیع ماهیانه دمای حداکثر در ماه‌های مختلف سال بخوبی برآورد شده و این درحالی است که در ماه‌های ژانویه و فوریه برآورد خوبی از دمای حداقل نداشته است. بالا بودن ضریب همبستگی R^2 در سری زمانی ماهانه دما طی این سالها (شکل ۷) حاکی از عملکرد مناسب داده‌های CRU می‌باشد.

براساس نتایج این قسمت، میانگین بارش در سطح منطقه مطالعاتی (زیرحوضه بالادست هیرمند) براساس داده‌های مشاهداتی و CRU به ترتیب مقدار ۳۲۳ و ۳۱۳ میلیمتر در سال برآورد می‌گردد. همچنین، توزیع ماهیانه بارش‌ها با استفاده از دو منبع داده‌ها در مقیاس کشوری، کل حوضه هیرمند و بالادست آن برآورد و در شکل ۴ ارائه شده‌اند. همانطور که از اشکال قابل ملاحظه است، عملکرد مناسب داده‌های CRU قابل صحنه‌گذاری می‌باشد.

۳-۱-۱- ارزیابی سری ۱۰۰ ساله بارندگی حوضه

با توجه به نتایج قبل، بررسی زمانی بارش برای دوره آمار موجود از CRU تهیه و برای حوضه بالا دست هیرمند برآورد شدند که نتایج سالیانه آن در شکل ۵ قابل مشاهده هستند. شکل نشان می‌دهد که بین سال‌های قبل از ۱۹۴۰ و بعد آن تفاوت مشهودی بین ارقام سالیانه قابل ملاحظه است. جهت نمایش بهتر این موضوع مقادیر میانگین‌های ۱۰ و ۳۰ ساله نیز در شکل آورده شده است.

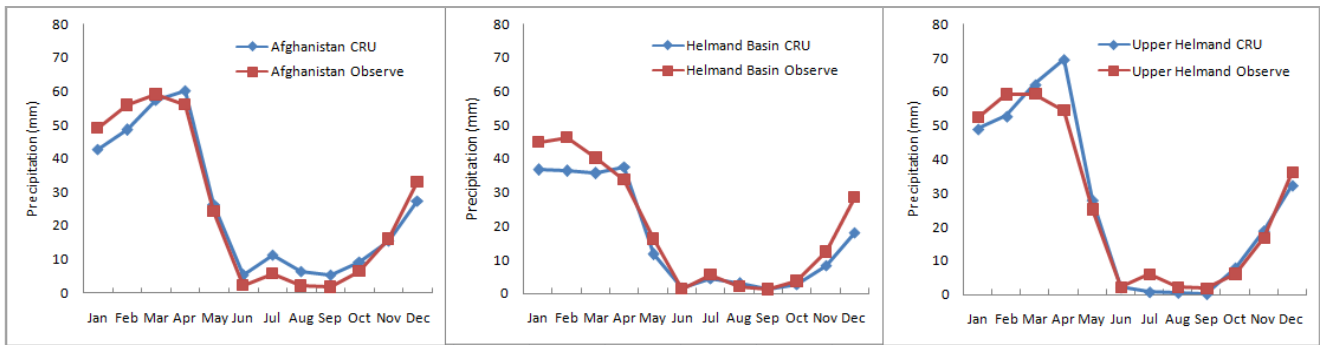
این تفاوت با آزمون همگنی من-ویتنی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در سطح ۱٪ معنی‌دار می‌باشد. در خصوص این تفاوت دو دلیل را می‌توان اذعان داشت، یکی اینکه واقعا دوره‌های پربارانی را حوضه در آن زمان تجربه می‌کرده است و دیگر اینکه خطای در داده‌ها CRU باشد، از آنرو که هرچه به آمار دورتر مراجعه



(الف)

(ب)

شکل ۳- میانگین بارش سالانه حوضه هیرمند با استفاده از (الف) شبکه داده‌های CRU و (ب) مشاهداتی (دوره ۱۹۶۱-۱۹۷۷م)

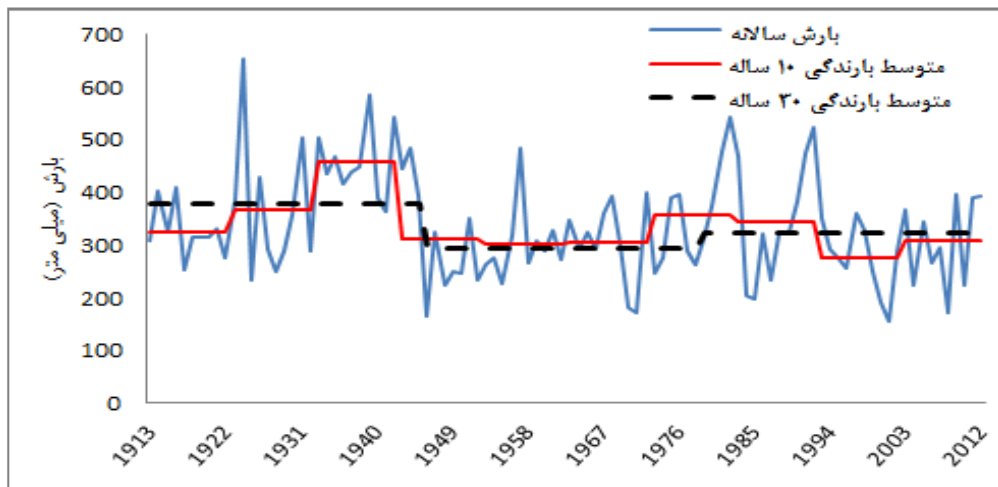


(الف)

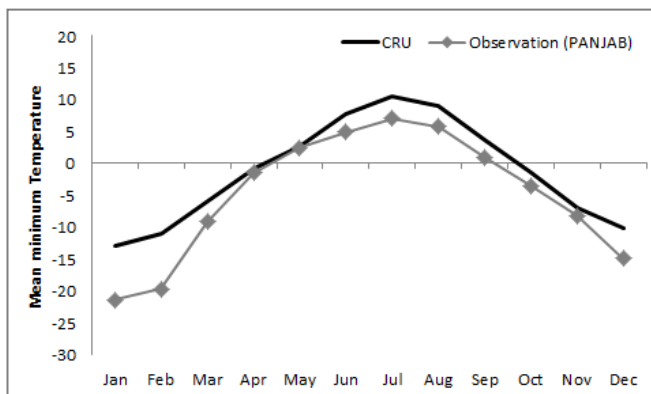
(ب)

(ج)

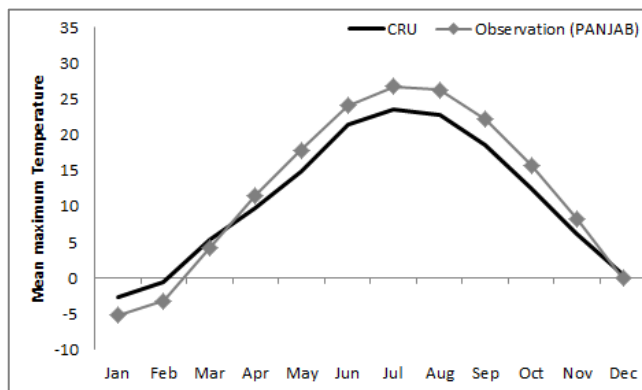
شکل ۴- مقایسه متوسط بارش ماهانه (دوره ۱۹۶۱-۱۹۷۷ م) (الف) کل افغانستان، (ب) حوضه هیرمند و (ج) زیرحوضه بالادست هیرمند توسط داده‌های مشاهداتی و CRU



شکل ۵- تغییرات متوسط سالیانه بارندگی در بالادست حوضه هیرمند با استفاده از داده‌های جهانی CRU طی دوره ۱۹۱۳-۲۰۱۲

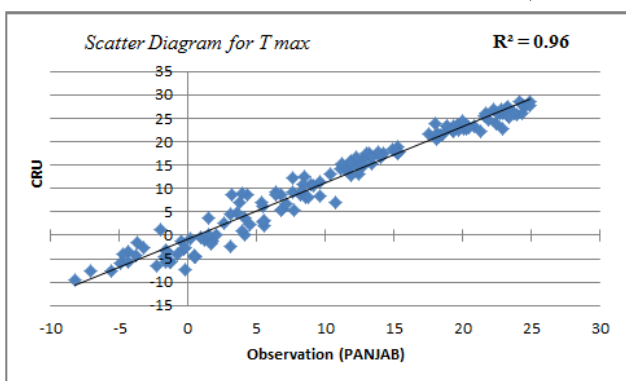


(ب)

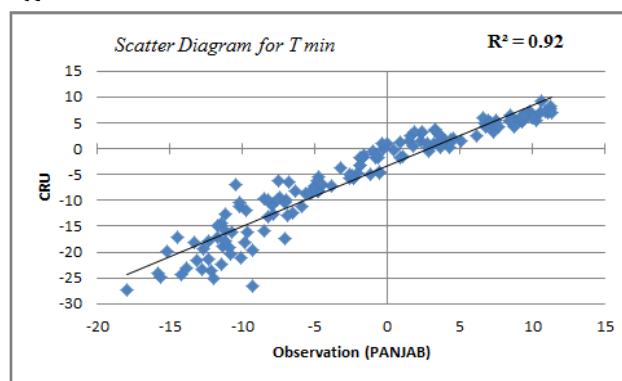


(الف)

شکل ۶- میانگین دمای ماهانه ایستگاه پنجاب، حوضه بالادست هیرمند (الف) دمای حداکثر ماهانه (ب) دمای حداقل ماهانه (دوره ۱۹۶۵-۱۹۷۷ م)



(ب)



(الف)

شکل ۷- نمودار پراکنش مقادیر میانگین ماهانه توسط پایگاه‌های داده CRU و مشاهداتی - پنجاب (دوره ۱۹۶۵ - ۱۹۷۷ م) (الف) دمای حداقل ماهانه (ب) دمای حداکثر ماهانه

برای منطقه مطالعاتی، در این قسمت به شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از این داده‌ها و مدل SWAT پرداخته می‌گردد. بدیهی است که در این بخش، آماده‌سازی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود که در این قسمت به آنها پرداخته می‌گردد.

۳-۱- آماده سازی مدل SWAT

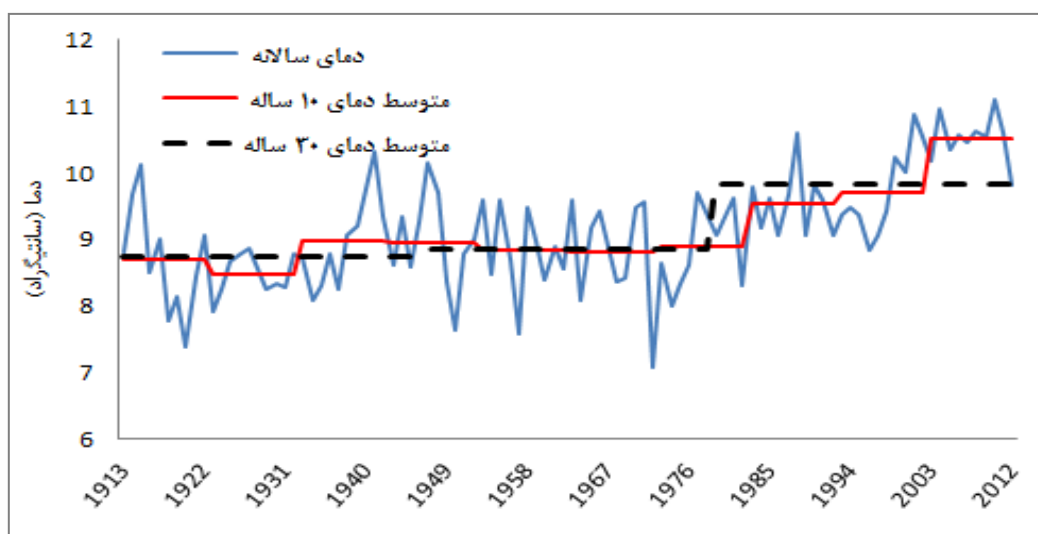
علاوه بر داده‌های دما و بارندگی که در قبل به آنها اشاره شد، برای اجرای مدل SWAT، لایه‌های رقمی پایه‌ای مورد نیاز است که فهرست و مرجع تامین آنها در جدول ۲ آمده است. در این خصوص، نقشه DEM^{۱۴} حوضه، اولین لایه اطلاعاتی مورد نیاز می‌باشد که با توجه به وسعت منطقه مطالعاتی از اندازه سلولی ۹۰ متری آن استفاده گردید. شکل ۹ نیز جزئیات بیشتری از این لایه‌ها را نشان می‌دهند.

۳-۲-۱- ارزیابی سری ۱۰۰ ساله دمای حوضه

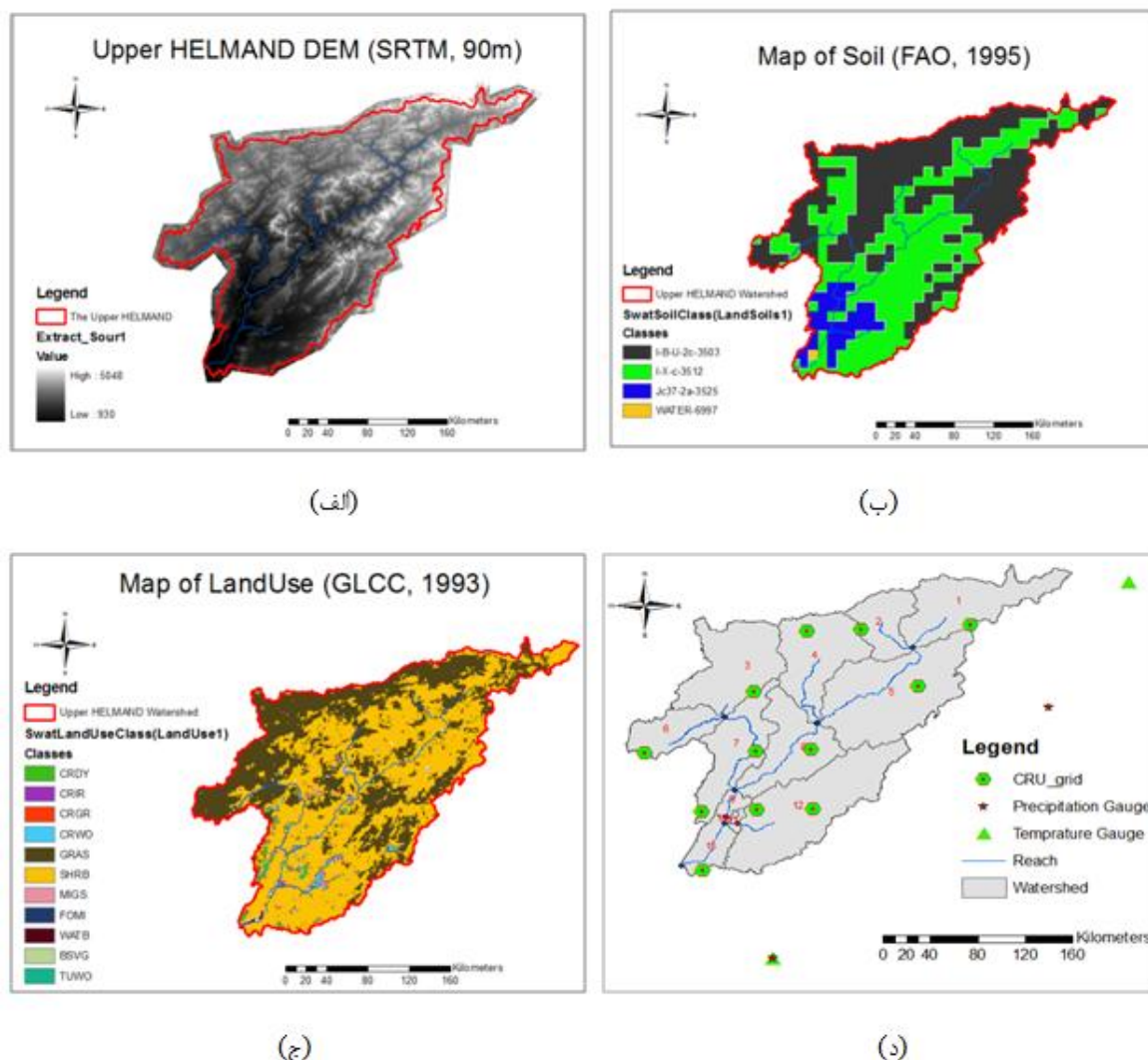
مانند قبل، مقادیر دمای سالیانه طی دوره داده‌های CRU در شکل ۸ آمده است. دو نکته از این سری زمانی قابل مشاهده می‌باشد. ابتدا اینکه تقریباً در دوره اول (مشابه بارندگی و قبل از سال ۱۹۴۰) دمای سالیانه عمدتاً کمتر از متوسط بلند مدت می‌باشد و دوم اینکه از اواخر دهه ۱۹۷۰ روند صعودی دما ملاحظه می‌شود. خطوط متوسط ۳۰ و ۱۰ ساله نیز بخوبی تغییرات میانگین‌ها را نشان می‌دهد. افزایش این ارقام طی سال‌های اخیر نسبت به اواخر دهه ۱۹۷۰، ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد است. معنی‌داری این روند با استفاده از آزمون‌های من-کندال و اسپیرمن مورد بررسی قرار گرفت که در سطح ۱٪ معنی‌دار و وجود روند را تأیید می‌کند.

۳-۳- شبیه‌سازی آورد رودخانه با اطلاعات CRU و SWAT

با استفاده از یافته‌های قبل، مبنی برای مناسب بودن داده‌های CRU



شکل ۸- تغییرات متوسط سالیانه دما در بالا دست حوضه هیرمند با استفاده از داده‌های جهانی CRU طی دوره ۱۹۱۳-۲۰۱۲



شکل ۹- داده‌ها و لایه‌های ورودی مدل SWAT. (الف) نقشه مدل رقمی ارتفاع حوضه (ب) نقشه خاک حوضه (ج) نقشه کاربری اراضی (د) زیرحوضه‌ها، آبراهه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مشاهداتی و CRU

مختلف مدل از جمله پارامترهای مربوط به دبی پایه و برف آن صورت گرفت. بر اساس نتایج فوق و پس از اجرای مدل در تعداد دفعات زیاد و انتخاب بهترین محدوده برای پارامترهای مذکور، نتایج مطلوبی برای دوره واسنجی بدست آمد (ضریب R^2 و NS به ترتیب به $0/78$ و $0/78$) که در شکل ۱۰ قابل مشاهده هستند.

– واسنجی مرحله دوم

برای بخش دوم، واسنجی مدل براساس داده‌های مشاهداتی دبی طی سالهای ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۶ و داده‌های CRU طی همین دوره به انجام رسید و مطابق با تحقیق (Bitew et al و Akhtar et al (2012) مجدداً واسنجی و تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف مدل SWAT تکرار شد. براساس نتایج حاصل، پارامترهای مربوط به دبی پایه شامل آب زیرزمینی، خاک و برف آن مورد توجه قرار گرفت. نهایتاً با توجه به همین نتایج و پس از اجرای مدل در تعداد دفعات زیاد و انتخاب بهترین محدود برای پارامترهای مذکور، واسنجی با استفاده از این داده‌ها انجام شد. در این مرحله، معیارهای آماری R^2 و NS به ترتیب $0/78$ و $0/78$ بدست آمد که در شکل ۱۱ نیز قابل ملاحظه است که برای شرایطی که این کار انجام شده و کمبود داده، نتایج بسیار مطلوبی می‌باشد.

– واسنجی مرحله سوم

این مرحله از واسنجی با هدف استفاده حداکثری از کل دوره ۲۷ ساله آبنسجی موجود از ایستگاه دهرآوود به انجام رسید. بطوریکه دوره ۱۹۵۳ تا ۱۹۶۸ برای واسنجی و دوره ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹ میلادی برای اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های اقلیمی نیز مجدداً از CRU برای همین دوره بکار رفت.

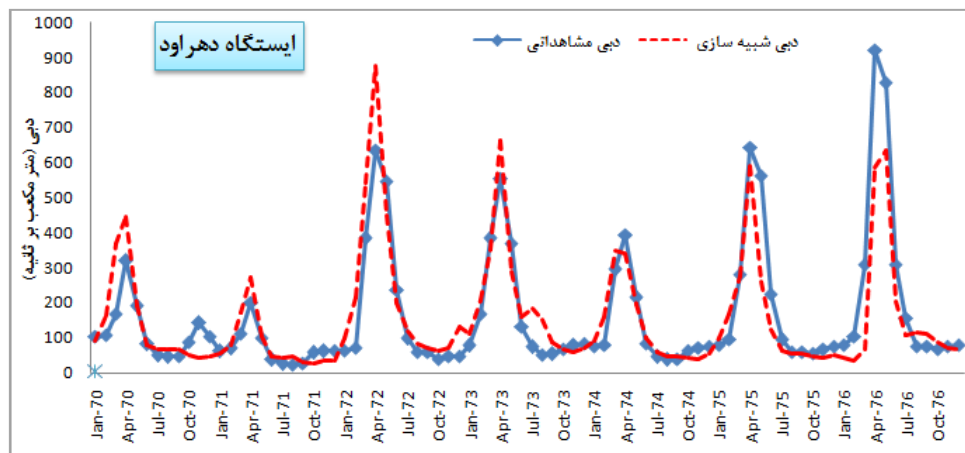
۳-۳-۲- واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

همانگونه که قبلاً اشاره شد، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT بخش مهمی از محاسبات این تحقیق بود. این کار با توجه به داده‌های موجود در سه مرحله مطابق زیر به به انجام رسید:

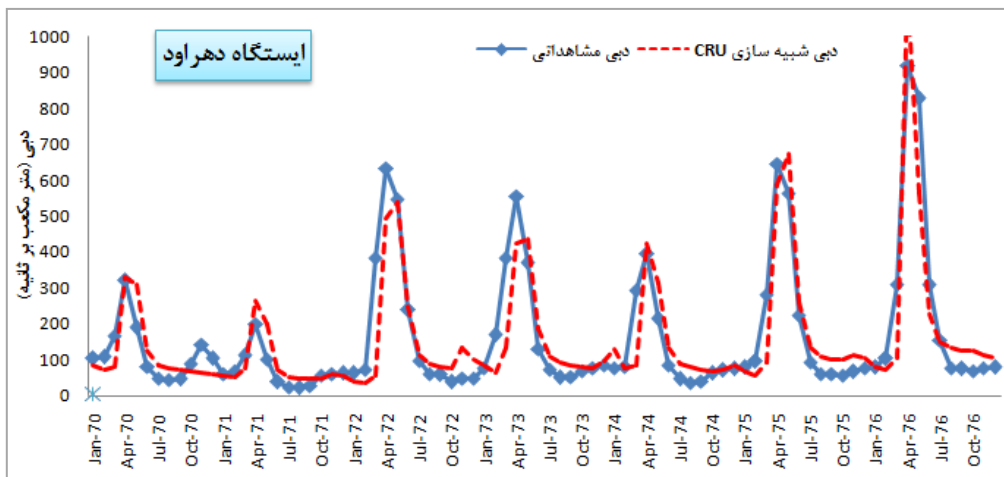
- مرحله اول- واسنجی و اعتبارسنجی براساس داده‌های مشاهداتی اقلیمی و آبنسجی برای دوره ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹
 - مرحله دوم- واسنجی و اعتبارسنجی براساس داده‌های اقلیمی CRU و مشاهداتی آبنسجی برای دوره ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۹
 - مرحله سوم- واسنجی و اعتبارسنجی براساس داده‌های اقلیمی CRU و مشاهداتی آبنسجی برای دوره ۱۹۵۳ تا ۱۹۷۹
- در ادامه این مراحل تشریح می‌شوند.

– واسنجی مرحله اول

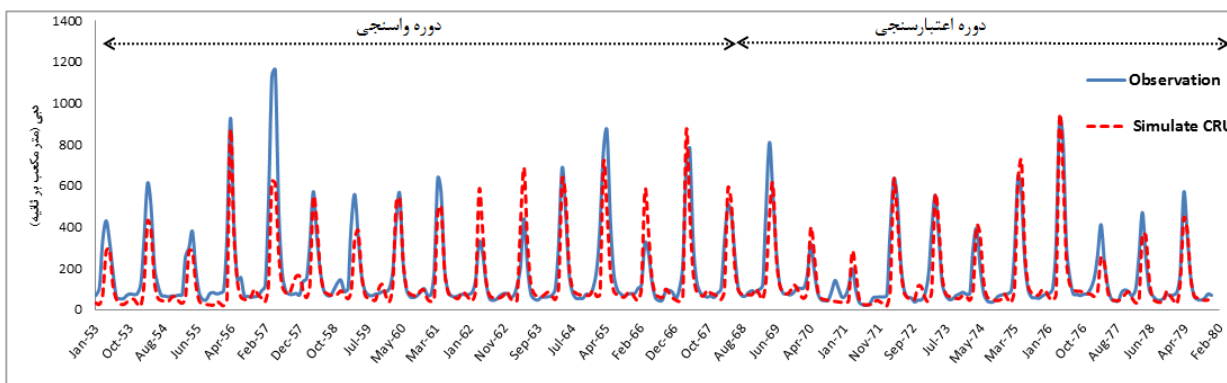
برای این قسمت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای دو دوره به ترتیب طی سال‌های ۱۹۶۹ تا ۱۹۷۶ و سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۷۹ به انجام رسید. براساس نتایج اولیه شبیه‌سازی ماهانه رواناب، مدل ضریب R^2 را $0/۱۶$ نشان داد. به دلیل برفی‌بودن حوضه بالادست هیرمند و تعداد کم ایستگاه‌های هواشناسی، لازم بود بخش برف مدل تقویت شود. مدل SWAT برای تقویت شبیه‌سازی در حوضه‌های برفی امکاناتی را با عنوان باندهای ارتفاعی (Elevation-Band) در خود جای داده است. بدین منظور می‌توان محدوده ارتفاعی هریک از زیرحوضه‌ها را تا ۱۰ بازه تقسیم و ارتفاع متوسط هر زیرحوضه را به همراه سهم مساحتی هر باند به مدل معرفی نمود. با معرفی باند ارتفاعی برای هر یک از زیرحوضه‌ها نتایج رضایت بخش‌تری حاصل شد، بطوریکه ضریب R^2 به $0/۱۶$ ارتقا یافت. علی‌رغم بهتر شدن معیارهای آماری، شبیه‌سازی دبی‌های پایه به خوبی انجام نشد. در ادامه واسنجی و تحلیل حساسیت پارامترهای



شکل ۱۰- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده بر اساس داده‌های هواشناسی مشاهداتی (۱۹۷۶-۱۹۷۰ م) در ایستگاه دهرآوود، ورودی سد کجکی



شکل ۱۱- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده بر اساس داده‌های هواشناسی جهانی



شکل ۱۲- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بر اساس داده‌های هواشناسی جهانی، ۱۹۵۳-۱۹۷۹ میلادی

می‌گردد. تاثیر این دوره با ملاحظه میانگین‌های ۱۰ و ۳۰ ساله بیشتر مشهود می‌باشد، بطوریکه میانگین ۳۰ ساله‌ها بین دوره اول و دو دوره دوم حدود ۴۰ تا ۵۰ مترمکعب بر ثانیه تفاوت دارد.

مانند بارش، آزمون من-وینتی ناهمگنی ارقام سال‌های قبل از ۱۹۴۱ و بعد از آن را در سطح ۱٪ معنی‌دار نشان می‌دهد. همچنین روندی بین داده‌ها بعد از این سال با دو آزمون من-کندال و اسپیرمن معنی‌دار و قابل ملاحظه نمی‌باشد. ولی برای کل دوره آماری نیز روند جزئی قابل ملاحظه است (جدول ۳).

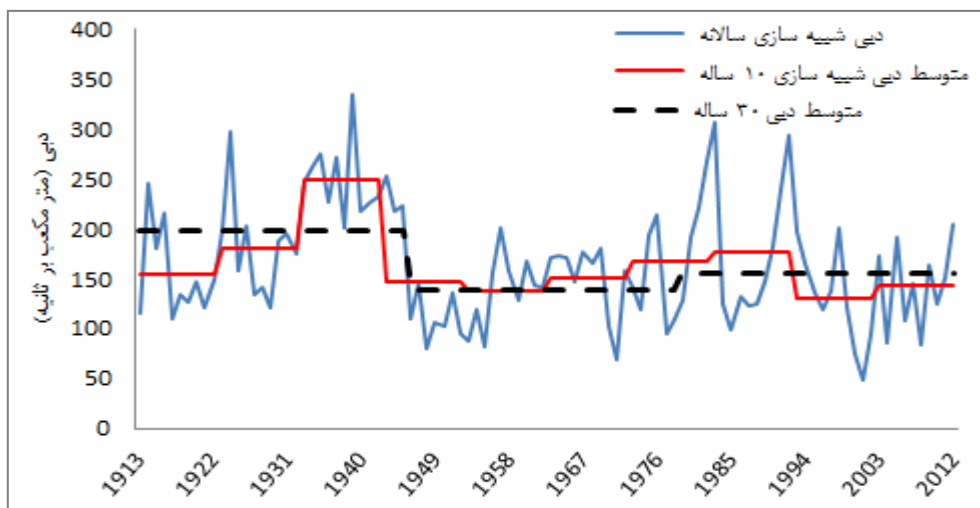
۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف امکان شبیه‌سازی و تحلیل بارش-رواناب در بالا دست حوضه هیرمند (ورودی سد کجکی) به انجام رسید و بدلیل کمبود داده و اطلاعات داده‌های جهانی بارش و دمای CRU و مدل هیدرولوژیکی SWAT مورد استفاده و بررسی قرار گرفت. نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه می‌باشد:

در این بخش ضمن انجام مجدد تحلیل حساسیت پارامترها، معیارهای آماری R^2 و NS محاسبه شد که برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۶۹، و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۷۹ و ۰/۸ بدست آمد. در شکل ۱۲ رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی در طول دوره‌های فوق قابل ملاحظه است که از وضعیت مطلوبی برخوردار می‌باشد.

۳-۳-۳- شبیه‌سازی و ارزیابی رواناب رودخانه هیرمند در سده اخیر با استفاده از داده‌های جهانی

در ادامه شبیه‌سازی جریان رودخانه در سده اخیر با استفاده از داده‌های اقلیمی جهانی CRU و براساس پارامترهای واسنجی شده مدل مرحله سوم (دوره سال‌های ۱۹۵۳ الی ۱۹۷۹) انجام پذیرفت. شکل ۱۳ سری تولید شده ۱۰۰ ساله از آورد رودخانه در ایستگاه دهراود (ایستگاه قبل از سد کجکی) را نشان می‌دهد. همانگونه که انتظار می‌رود، روند ارقام سالانه متأثر از عوامل اقلیمی و بخصوص بارندگی‌ها می‌باشد. مجدداً برای سال‌های قبل از اوائل دهه ۱۹۴۰ به واسطه بالا بودن بارش‌ها و کم بودن دما، سال‌های پرباری مشاهده



شکل ۱۳- تغییرات متوسط سالیانه دبی شبیه‌سازی در بالا دست حوضه هیرمند با استفاده از داده‌های جهانی CRU طی دوره ۱۹۱۳-۲۰۱۲

جدول ۳- مقادیر آماره من- کندال (Z) برای سری زمانی سالانه دما، بارش و دبی

سری زمانی	آماره Z	سطح معنی‌داری (%)	آماره Z	سطح معنی‌داری (%)
دوره زمانی		۱۹۱۳-۲۰۱۲		۱۹۴۱-۲۰۱۲
دبی (mcm)	-۲/۰۸	۱۰	-۰/۷۲	-
بارش (mm)	-۱/۸۱	۱	-۰/۴۴	-
دما (C)	۶/۱۴	۰/۱	۶/۱۴	۰/۱

داده‌های مشاهداتی و جهانی با توجه به معیارهای آماری NS و R^2 همواره بالای ۰/۷۰ بودند.

در ادامه بررسی روند و تغییرات جریان طی صده اخیر نشان داد که رواناب نیز کم و بیش رفتار بارش‌ها را دارد. طی سده اخیر و قبل از ۱۹۴۰، آورد رودخانه بطور معنی‌داری نسبی به شرایط فعلی تفاوت دارد و شاهد کاهش میانگین سالیانه از حجم ۸/۱ میلیارد متر مکعب در سال به ۶/۰۷ هستیم. بعد از این تاریخ تا حدودی کاهش رواناب قابل ملاحظه است که عمدتاً متأثر از افزایش دما است، ولی این تغییرات معنی‌دار نیستند.

روش‌شناسی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت، نشان داد که می‌توان مشکل شبیه‌سازی حوضه‌های آبریزهای فرامرزی پیرامون کشور را تا حد زیادی مرتفع نمود و حتی با کار تکمیلی می‌تواند از قابلیت بوجود آمده برای پیش‌بینی آورد رودخانه نیز استفاده نمود که هم اکنون توسط مولفین مقاله در حال انجام می‌باشد.

نتایج مقایسه الگوهای بارش متوسط ماهانه و سالانه در سطح کشور افغانستان، در دوره زمانی مشترک ۱۹۶۱-۱۹۷۷ میلادی، عملکرد مناسب داده‌های CRU را صحنه می‌گذارد. بطوریکه میانگین بارش در سطح منطقه مطالعاتی (زیرحوضه بالادست هیرمند) براساس داده‌های مشاهداتی و CRU، به ترتیب مقدار ۳۲۳ و ۳۱۳ میلی‌متر در سال برآورد شد. برای دما نیز نتایج قابل قبول بود، هرچند که کمبود ایستگاه برای این بخش مانع از ارزیابی دقیق‌تری داده‌های CRU بود.

ارزیابی صد ساله داده‌های دما و بارش CRU نشان داد که نوعی ناهمگنی بین داده‌های آن تا ابتدای دهه ۱۹۴۰ و بعد آن می‌باشد. بطوریکه بارش‌ها قبل از این تاریخ بطور معنی‌داری از مقادیر بعد آن بیشتر و دما کمتر می‌باشد. بعد از این تاریخ روند معنی‌داری در بارش‌ها ملاحظه نشد، ولی دما روند دارد.

توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان حوضه بالادست هیرمند با استفاده از داده‌های هواشناسی مشاهداتی و همچنین با استفاده از داده‌های جهانی CRU نشان داد که مدل توانایی لازم را در این خصوص دارا می‌باشد. بطوریکه عملکرد مدل با استفاده از

- Akhtar M, Ahmad N and Booij M J (2009) Use of regional climate model simulations as input for hydrological models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya region. *Hydrology and Earth System Science* 13(7):1075-1089.
- Acres International Corporation Amherst, New York (2004) Kajakai Hydroelectric Project Condition Assessment Dam, Safety Assessment Report
- Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, Williams JR, Haney EB, Neitsch SL (2011) Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation: Version 2009.
- 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.
- Burn HB, Elnur MAH (2002) Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology* 255: 107 -122.
- Carrie MV (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.
- Carrie MV and Jacobs J M (2011) Snowpack and runoff generation using AMSR-E passive microwave observations in the Upper Helmand Watershed, Afghanistan. *Remote Sensing of Environment* (115): 3313-3321.
- Fadil A, Rhinane H, Kaoukaya A, Kharchaf Y and Alami Bachir O (2011) Hydrologic modeling of the Bouregreg watershed (Morocco) using GIS and SWAT model. *Journal of Geographic Information System*. 3: 279-289.
- Harris I, Jones PD, Osborn TJ and Lister DH (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 dataset. *International Journal of Climatology* 34(3):623-642
- Kendall MG (1975) Rank correlation methods. Griffin, London, UK.
- Kahya E, Kalayci S (2004) Trend analysis of streamflow in Turkey. *Journal of Hydrology*, 289: 128-144.
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend, *Econometrica*. 13:245-259.
- BITEW M M, GEBREMICHAEL M, GHEBREMICHAEL L T, BAYISSA Y. A(2011) Evaluation of high-resolution satellite rainfall products through streamflow simulation in a hydrological modeling of a small mountainous watershed in Ethiopia. *Hydrometeorology* 13:338-350

- 1-Climate Research Unit
- 2-Soil and Water Assessment tool
- 3-Climate Research Unit (www.cru.uea.ac.uk)
- 4-Soil and Water Assessment Tool
- 5-Regional Climate Models
- 6-Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning
- 7-National Oceanic and Atmospheric Administration
- 8-US Agency for International Development
- 9-University of California-Davis
- 10-Digital Elevation Model
- 11-Global U.S. Geological 2000
- 12-Global Land Use, Land Cover Characterization (GLCC,1993)
- 13-Global soil map of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO,1995)
- 14-University of East Anglia
- 15-Land Phase
- 16-Water Routing Phase
- 17-Variable Storage
- 18- Digital Elevation Model

۵- مراجع

- ایران نژاد پ، احمدی گیوی ف و پازوکی ر (۱۳۸۸) نقش روش‌های متفاوت پارامترسازی همرفت در شبیه‌سازی میدان‌های دما و بارش زمستانی با مدل منطقه‌ای - اقلیمی RegCM در منطقه ایران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، دوره ۳۵، شماره ۱: ۱۰۱-۱۲۰.
- تجربشی م (۱۳۸۲) پروژه رودخانه‌های مرزی - حوضه آبریز هیرمند. دفتر مطالعات آب و محیط زیست (EWRC)، دانشگاه صنعتی شریف. ۳۴۰ صفحه.
- حاجی حسینی ح، حاجی حسینی م، مرید س و دلاور م، (۱۳۹۳). مدل‌سازی هیدرولوژیکی بالادست حوضه فرامرزی هیرمند با استفاده از مدل SWAT، *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی* دانشگاه صنعتی اصفهان، در نوبت چاپ.
- سبزی‌پرور ع، شادمانی م (۱۳۹۰) تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من-کندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، جلد ۲۵، شماره ۴: ۸۳۳-۸۳۴.
- فتحیان ف (۱۳۹۰) بررسی روند تغییرات کاربری اراضی با استفاده از فن آوری سنجش از دور و متغیرهای آب و هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

- Schuol J, Abbaspour KC (2007) Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. *Journal of ecological modelling* 201(3-4): 301–311
- Schuol J, Abbaspour KC, Yang H, Srinivasan R, Alexander J and Zehnder B (2008). Modeling blue and green water availability in Africa. *Journal of Water Resources Research*, 44, W07406, doi:10.1029/2007WR006609.
- USACE (2007) Water balance and regulation alternative analysis for Kajakai Reservoir using HEC-ResSim. PR-63, U.S. Army Corps of Engineers.
- Williams-Sether T (2008) Streamflow characteristics of streams in the Helmand Basin, Afghanistan. Data Series 333, U.S. Geological Survey.
- Watershed Atlas of Afghanistan (2004), Raphy Favre, Watershed Consultant Golam Monowar Kamal, AIMS Field Coordinator, January 2004, Kabul.
- Yue S, Pilon P, Cavadias G (2002) Power of the Mann-Kendall and Spearman s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259: 254-271.
- Zhao G, Hormann G (2010) Streamflow trends and climate variability impacts in Poyang Lake Basin, China. *Water Resour Manage*, 24: 689-706.
- Vu M. T, Raghavan S. V, Liong S. Y. 2012. SWAT use of gridded observations for simulating runoff – a Vietnam river basin study. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 2801–2811.
- Mitchell TD and Jones PD (2005) An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* 25: 693-712.
- Najafi A, Vatanfada J(2011) Environmental challenges in trans-boundary waters, case study: Hamoon Hirmand Wetland (Iran and Afghanistan). *International Journal of Water Resources and Arid Environments* 1(1): 16-24.
- New M, Lister D, Hulme M and Makin I (2002) A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research* 21(1)1-25.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR and Williams JR (2009) Soil and Water Assessment Tool. Teoretical Documentation. NCDC (2010) Climatology for Southwest Asia. National Climatic Data Center.
- Rossi CG, Srinivasan R, Jirayoot K, Le Duc T, Souvannabouth P, Binh N and Gassman PW (2009) Hydrologic evaluation of the lower Mekong River Basin with the Soil and Water Assessment Tool model. *International Agricultural Engineering Journal*. 18(1-2):1-13.