



## Sustainability Outlook of Domestic and Agricultural Demand of Doosti Dam Considering Climate Change Scenarios and Impact of Salma Dam

H. Nazari Mejdari<sup>1</sup>, A. Moridi<sup>2\*</sup>, J. Yazdi<sup>3</sup>,  
and A. Khazaei Pool<sup>4</sup>

### Abstract

Harirud River is one of the main sources of water in the northeastern regions of Iran and the south of Turkmenistan. Harirud is a provider of drinking and agricultural demand for a large number of people and regarded as one of the concerns of the two countries in terms of water sustainability. The planning and management of water resources in the transboundary basin because of missing or lack of access to weather information and hydrology in the riparian countries is stressful. In this paper, by coupling the SWAT hydrologic model and WEAP water resource planning and management model, we have tried to study the effect of upstream development as well as climate change on water inputs from the Harirud Transboundary River to Iran and Turkmenistan. The years 1955 to 1996 considered for calibration and the period from 1997 to 2016 to validate the SWAT model. The R2 and NS numbers were 0.66 and 0.65 for the calibration period, 0.7, and 0.72 for the calibration period, respectively. Most areas of the Doosti basin will face a rise in temperature (about 1.5 to 3.8 degrees) and precipitation decline, especially in upstream mountainous regions. Based on the results of the operation of the Salma Dam and RCP 8.5 climate change scenario, the reliability and sustainability of agricultural water supply in Iran and Turkmenistan will reduce to less than 3%. Changing the climate pattern will face the challenge of meeting the environmental needs of downstream of Doosti and Salma dams. This trouble reveals the necessity of hydro policy between the riparian countries. If the current condition continues in this way, water shortage in Sarakhs becomes the primary social challenge in the northeast of Iran.

**Keywords:** Doosti River Basin, Transboundary River, Climate Change, SWAT-WEAP Coupling.

Received: June 17, 2018

Accepted: February 7, 2019

## چشم‌انداز پایداری تأمین نیازهای شرب و کشاورزی سد دوستی تحت سناریوهای تغییر اقلیم و بهره‌برداری از سد سلما

حسن نظری مجدر<sup>۱</sup>، علی مریدی<sup>۲\*</sup>، جعفر یزدی<sup>۳</sup>  
و احمد خزائی پول<sup>۴</sup>

### چکیده

رودخانه هریرود از منابع اصلی آب ورودی به بخش‌هایی از مناطق شمال شرقی ایران و جنوب ترکمنستان و تأمین‌کننده نیاز شرب و کشاورزی جمعیت زیادی از مردم است که به‌عنوان یکی از نگرانی‌های این دو کشور به لحاظ پایداری جریان ورودی تلقی می‌شده است. برنامه‌ریزی صحیح منابع آب در حوضه‌های مرزی به دلیل فقدان یا عدم دسترسی به اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی کشورهای همسایه با سختی روبروست. در این مقاله با تلفیق مدل هیدرولوژیکی SWAT و مدل برنامه‌ریزی منابع آب WEAP سعی شده است تا به بررسی اثر توسعه بالادست و همچنین تغییر اقلیم بر کاهش منابع آب ورودی از حوضه مرزی هریرود به کشورهای ایران و ترکمنستان صورت پذیرد. سال‌های ۱۹۵۵ تا ۱۹۹۶ برای دوره صحت‌سنجی و از سال ۲۰۱۶-۱۹۹۷ برای واسنجی مدل SWAT قرار داده شد. عدد R<sup>2</sup> و NS بترتیب ۰/۶۶ و ۰/۶۵ برای دوره صحت‌سنجی و ۰/۷ و ۰/۷۲ برای دوره واسنجی به دست آمد. اغلب مناطق حوضه آبریز سد دوستی با افزایش دما (در حدود ۱/۵ تا ۳/۸ درجه) و کاهش بارش به‌ویژه در مناطق کوهستانی بالادست مواجه خواهد بود. بر اساس نتایج به دست آمده در صورت بهره‌برداری از سد سلما و اعمال سناریو تغییر اقلیم RCP8.5 اطمینان‌پذیری حجمی و پایداری تأمین آب کشاورزی کشورهای ایران و ترکمنستان به کم‌تر از ۳ درصد تقلیل می‌یابد. تغییر الگوی آب و هوایی و احداث سد سلما تأمین نیازهای زیست محیطی در پائین‌دست سد دوستی را با چالش جدی روبرو خواهد کرد. این موضوع ضرورت برقراری دیپلماسی آب بین کشورهای ایران، افغانستان و ترکمنستان را دوچندان می‌کند. در صورت ادامه روند فعلی چالش‌های جدی اجتماعی در دشت سرخس ناشی از عدم امکان تأمین آب ایجاد خواهد شد. همچنین برای تأمین آب شرب مشهد می‌بایستی منابع تأمین با اطمینان‌پذیری بیشتر شناسایی شود.

**کلمات کلیدی:** حوضه آبریز سد دوستی، رودخانه مرزی، تغییر اقلیم، ترکیب مدل SWAT-WEAP.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۳/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۱۸

1- M.Sc Graduate of Water Resources Engineering and Management, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: [hsn.nazari90@gmail.com](mailto:hsn.nazari90@gmail.com)

2- Assistant Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: [a\\_moridi@sbu.ac.ir](mailto:a_moridi@sbu.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: [j\\_yazdi@sbu.ac.ir](mailto:j_yazdi@sbu.ac.ir)

4- PhD Candidate, Department of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: [a.khazaei1388@gmail.com](mailto:a.khazaei1388@gmail.com)

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

جهت تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی برای مدیران فراهم می‌کنند (Gain and Giupponi, 2015).

با وجود توانمندی مدل SWAT در امر شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه‌ای، این مدل قادر به برنامه‌ریزی و تخصیص آب نیست. لذا پژوهشگرانی درصدد برآمدند از این مدل در ترکیب با یک مدل برنامه‌ریزی و تخصیص آب استفاده کنند. برای مثال می‌توان به مطالعه SWAT با مدل MODSIM به منظور تخصیص و بهینه‌سازی عملکرد محصول بهره‌جستند. اگرچه مدل‌های حوضه مقیاس متنوعی برای ارزیابی و تخصیص آب به نیازها وجود دارند ولی بسیاری از آنها فاقد ابزار سناریوسازی می‌باشند (Maliehe and Mulungu, 2017). سیستم ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP<sup>1</sup>) که توسط موسسه محیط زیست استکهلم (SEI, Stockholm, Sweden) توسعه داده شده از چنین ظرفیتی برخوردار می‌باشد و برای ارائه و ارزیابی بسیاری از سناریوهای مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است (Yates et al., 2005) که از آن جمله می‌توان مطالعات (Li et al., 2015; Ibisch et al., 2016; Adgolign et al., 2016; Okungu et al., 2017) اشاره کرد.

نوآوری این مقاله در دویبخش متدولوژی و مطالعه موردی حایز اهمیت است. در بخش متدولوژی ترکیب مدل SWAT و WEAP، ظرفیت مناسبی را برای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب و تخصیص بوجود آورده است. بخصوص اینکه این ترکیب برای یک حوضه فرامرزی با محدودیت‌های خاص داده‌ای بکار رفته است. در پاسخ به این کمبود اطلاعات، از داده‌های پایگاه جهانی CRU استفاده شده است. از طرفی دیگر نیز مقاله به چالشی راهبردی در تأمین آب در شمال شرق کشور می‌پردازد. هدف اصلی این کار پیش‌بینی شرایط پایداری تأمین نیاز شرب، کشاورزی و محیط زیست سد دوستی در آینده با توجه به احداث سد سلما و تغییرات اقلیم است. همچنین، این ترکیب مدل‌سازی مورد استفاده می‌تواند به عنوان سامانه پشتیبانی از تصمیم (DSS) جهت سناریوسازی در مذاکرات احتمالی پیشرو و برنامه‌ریزی و جلوگیری از تنش‌های اجتماعی و امنیتی در شمال شرق ایران مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش‌شناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد دوستی (DRB<sup>2</sup>) (به مساحت تقریبی ۶۳۰ کیلومتر مربع) بین عرض جغرافیایی ۵۹/۲۵ و ۶۷/۲۵ و طول جغرافیایی ۳۳/۲۵ و ۳۶/۲۵ از کوه‌های مرکزی افغانستان (هندوکش) تا سد دوستی در

رودخانه هریرود از جمله رودخانه‌های مشترک ایران، افغانستان و ترکمنستان است که از افغانستان سرچشمه می‌گیرد. این رود مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب شمال شرق ایران بوده و سد مشترک دوستی میان ایران و ترکمنستان جهت مدیریت و بهره‌برداری بهتر آب، بر روی آن احداث شده است. همچنین سالانه در حدود ۱۵۰ میلیون متر مکعب از آب سد دوستی برای تأمین آب شرب شهر مشهد و ۲۷۸ میلیون مترمکعب برای کشاورزی دشت سرخس تخصیص می‌یابد (Alaei, 2011; Thomas and Warner, 2015; Shoghi Javan ) (and Ahmadi, 2019; Moshfegh et al., 2019).

افغانستان در سال ۲۰۰۴ با هدف توسعه کشاورزی خود، تصمیم به احداث سد سلما نمود که مرحله آبیگری آن از سال ۲۰۱۶ شروع شده است. میزان ظرفیت این مخزن برابر ۵۶۰ میلیون مترمکعب است. احداث این سد باعث می‌شود تا میزان ورودی سد دوستی به ۳۰ درصد تقلیل یابد (Peterson, 2013). این امر می‌تواند میزان تأمین آب شرب شهر مشهد را به میزان قابل توجهی با مشکل مواجه سازد. برای بررسی کمی تبعات این سد از ترکیب مدل‌های SWAT بواسطه ظرفیت مناسب آن در شبیه‌سازی بارش- رواناب و WEAP بدلیل توانمندی مدل در تخصیص آب، استفاده شده است.

مدل SWAT یک مدل هیدرولوژیکی پیوسته زمانی، نیمه توزیع شده است که قادر به شبیه‌سازی جریان و انتقال در چرخه هیدرولوژیکی با متغیرهای خاک، کاربری اراضی و شریط مدیریت است (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011). به عنوان یکی از مدل‌های مقیاس حوضه آبریز و رودخانه در سطح جهان برای طیف گسترده‌ای از مشکلات هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی (Gassman et al., 2014) و نیز در برآورد رواناب (Höllermann et al., 2010; Rahman et al., 2013; Qiu et al., 2012; Tibebe and Bewket, 2011) مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل که از سوی پژوهشگران به عنوان ابزاری بسیار کارآمد، توصیه شده قادر است تا در حوضه‌های فاقد ایستگاه هواشناسی نیز کارایی مناسبی را از خود ارائه دهد (Hajihoseini et al., 2015). همچنین می‌توان از طریق این مدل اثر تغییرات اقلیم را مورد مطالعه قرار داده و تغییرات جریان را تحت شریط آب و هوایی مختلف پیش‌بینی نمود (Adgolign et al., 2016; Adhikari and Nejadhashemi, 2016; Huyen et al., 2017; Zhu et al., 2018; Shiferaw et al., 2018). بررسی تأثیر تغییرات منابع آب بر میزان تأمین باید از مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب بهره‌جست، چرا که این مدل‌ها اطلاعاتی حیاتی

## ۲-۱- معرفی مدل SWAT

ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) یک مدل هیدرولوژیکی پیوسته زمانی، مبتنی بر فرآیند، نیمه توزیع شده است که قادر به شبیه‌سازی جریان در حوضه‌های بزرگ و پیچیده با متغیرهای خاک، کاربری اراضی و شریط مدیریت است (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011). در سال‌های اخیر استفاده از مدل SWAT برای بررسی اثرات تغییر اقلیم، تغییرات کاربری ارضی، تغییر الگوی کشت و یا اثر همزمان دو یا چند از موارد بالا بر میزان آبدهی یا انتشار آلاینده‌ها بسیار چشمگیر شده است (Narsimlu et al., 2013; Kumar et al., 2018).

در مدل SWAT ناهمگونی فضایی حوضه آبریز توسط توپوگرافی با تقسیم حوضه به چندین حوضه کوچک به نام واحدهای واکنش هیدرولوژیکی (HRU<sup>3</sup>) بر اساس خاک، کاربری زمین و ویژگی‌های شیب انجام می‌گیرد. حجم رواناب ناشی از بارندگی یکی از متغیرهای هیدرولوژیکی مهم در تعیین میزان کل دبی خروجی از حوضه‌ها، دبی اوج و غیره تلقی می‌گردد. مدل SWAT برای محاسبه این مقدار در حوضه از دو روش شماره منحنی SCS و معادله نفوذ گرین-آمپت استفاده می‌کند (Neitsch et al., 2011). امروزه الگوریتم SUFI-2 مرسوم‌ترین روش صحت‌سنجی در SWAT است که در برنامه SWAT-CUP تعبیه شده (Abbaspour et al., 2004) که در این مطالعه هم استفاده شد.

انتهای حوضه آبریز کشیده شده است (شکل ۱). متوسط بارش و دما سالیانه در این حوضه آبریز به ترتیب در حدود ۲۷۶ میلیمتر و ۱۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رودخانه هریرود که در این حوضه جریان دارد یکی از منابع اصلی آب ورودی به بخش‌هایی از مناطق شمال شرقی ایران و جنوب ترکمنستان و تأمین‌کننده نیاز شرب و کشاورزی جمعیت زیادی از مردم بوده و همواره به عنوان یکی از نگرانی‌های این دو کشور به لحاظ تداوم جریان ورودی تلقی شده است.

سد دوستی در مرز ایران و ترکمنستان در ۱۸۰ کیلومتری شهر مشهد و در انتهای حوضه آبریز سد دوستی واقع شده است. مخزن این سد دارای گنجایش ۱۲۵۰ میلیون متر مکعب است (Nairizi, 2006) که به منظور کنترل آب هریرود و تأمین آب شهر مشهد و کشاورزی در دشت سرخس احداث شده است. در بالادست سد دوستی، سد سلما در نواحی بالادست هریرود در نزدیکی شهر چشت شریف در ولایت هرات در غرب افغانستان و به ظرفیت ۶۳۳ میلیون مترمکعب قرار دارد. سد سلما در کنار تولید ۴۲ مگاوات ساعت برق و تأمین برق ۴۰۰۰۰ خانوار، ظرفیت آبیاری حدود ۸۰ هزار هکتار زمین کشاورزی را نیز دارد. تغییر الگوی آب و هوایی موجب کاهش بارش در حوضه آبریز سد دوستی می‌شود و با توجه به اینکه ۷۰ درصد آب رودخانه هریرود در بالادست سد سلما قرار دارد (Peterson, 2013)، ساخت آن باعث کاهش شدید آورد ورودی رودخانه هریرود به سد دوستی خواهد شد.

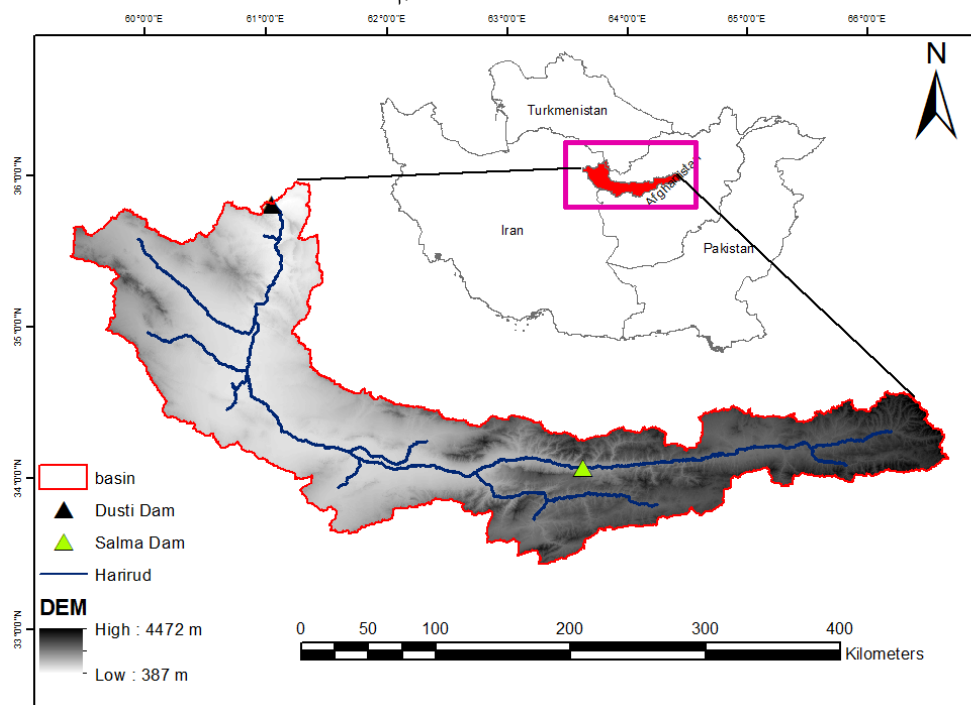


Fig. 1- Location of Dusti river basin, Harirud river, Dusti and Salma dams (DEM Adopted from USGS site) شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز سد دوستی، رودخانه هریرود و سدهای دوستی و سلما (اطلاعات DEM برگرفته از سایت USGS)

برای هر گره و اتصال در سیستم در گام‌های زمانی، حل می‌کند. آب برای تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان و میزان جریان پایین‌دست، بر اساس اولویت نیازها، برتری منبع، معادله تعادل جرم و سیر محدودیت‌ها، تخصیص می‌یابد.

#### ۲-۴- ترکیب مدل هیدرولوژیکی و مدل تخصیص منابع آب

عدم برنامه‌ریزی برای تخصیص آب در بین نیازهای موجود یکی از نقاط ضعف مدل SWAT است (Ashraf Vaghefi et al., 2017a). برای رفع این موضوع از ترکیب دو مدل SWAT و WEAP برای مطالعه آب در دسترس و تخصیص منابع آب به نیازهای موجود تحت سناریوهای تغییر اقلیم استفاده شده است. نحوه تعامل و تبادل اطلاعات بین مدل‌های SWAT و WEAP در شکل ۲ نشان داده شده است.

گام‌های ساخت مدل SWAT-WEAP مطابق زیر قابل ارائه هستند: (۱) ساخت مدل SWAT با استفاده از داده‌های پایه (شکل ۲)، (۲) صحت‌سنجی و واسنجی مدل SWAT با استفاده از SWAT-CUP، (۳) رواناب ورودی به بالادست سلما و رواناب میان‌حوضه از اطلاعات مربوط به زیر حوضه ۲۶ و ۳ از مدل SWAT استخراج شده است (شکل ۳، ۴) اجرای مدل WEAP و تعیین آب تخصیص داده شده در هر سناریوی تاریخی و تغییر اقلیم.

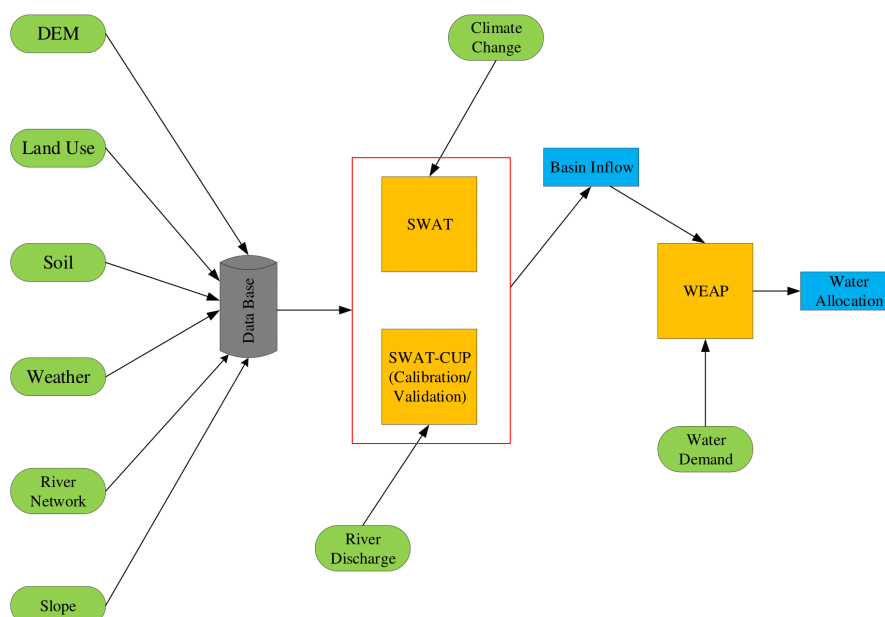


Fig. 2- Overview of the input–output and information exchange in the SWAT–WEAP model

شکل ۲- نحوه تعامل و تبادل اطلاعات بین مدل‌های SWAT و WEAP

SUFI عدم قطعیت پارامترهای صحت‌سنجی شده را با باند عدم قطعیت ۹۵٪ تعیین می‌کند (Fereidoon and Koch, 2018) (PPU95). سپس عملکرد مدل کالیبراسیون نهایی توسط دو شاخص: P-factor و R-factor ارزیابی می‌شود. P-factor درصد داده‌های اندازه‌گیری شده در محدوده باند عدم قطعیت ۹۵٪ است که با عددی در بازه صفر تا ۱ بیان می‌شود. هرچه P-factor به یک نزدیک‌تر باشد رضایت‌بخش‌تر است (Abbaspour et al., 2007). R-factor نشان‌دهنده عرض نسبی باند عدم قطعیت ۹۵٪ تقسیم بر انحراف معیار متغیر اندازه‌گیری شده است که بین صفر و بی نهایت متغیر است و برای برآورد جریان مقدار آن حدود یک پارامتر مطلوب است (Moriasi et al., 2007). کیفیت انطباق خروجی مدل مثلاً جریان به مقدار اندازه‌گیری شده با ضریب نش- ساتکلیف (NS) یا  $R^2$  مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Abbaspour et al., 2004).

#### ۲-۳- معرفی مدل WEAP

سیستم ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WEAP) در سال ۱۹۸۸ ایجاد شد که توسط مرکز مؤسسه محیط زیست استکهلم، مؤسسه پژوهشی غیرانتفاعی مستقر در دانشگاه Tufts در Somerville ماساچوست توسعه و پشتیبانی می‌شود. این برنامه به طور گسترده‌ای برای مطالعات انطباق تغییرات آب و هوایی استفاده می‌شود و توسط محققان و برنامه‌ریزان در صدها سازمان در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است (Yates et al., 2005). WEAP یک معادله تعادل جرم آب،

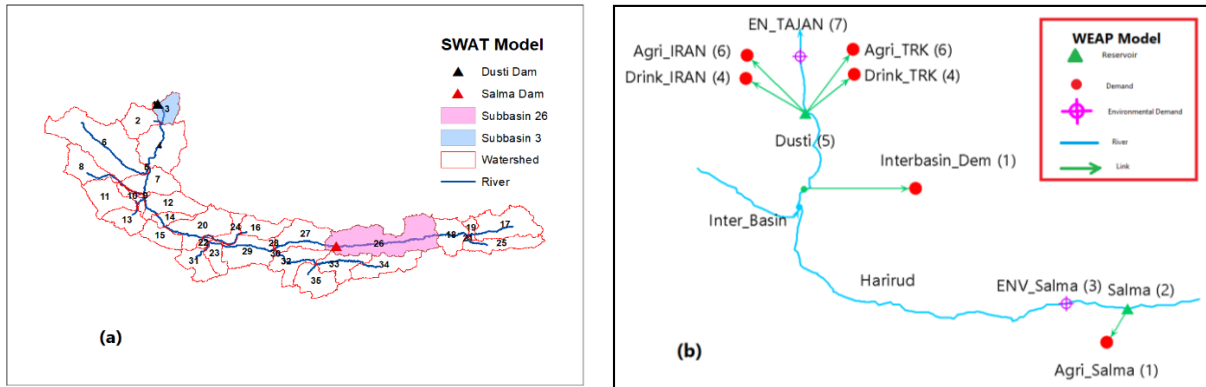


Fig. 3- (a) DRB system in the SWAT River network and (b) water allocation system in WEAP.

شکل ۳- (a) مدل SWAT و (b) مدل WEAP در حوضه سد دوستی

کل کمبودها به تعداد گام‌هایی که در آن‌ها کمبود اتفاق افتاده تقسیم بر کل نیاز کاربر زام که می‌تواند سالانه و یا براساس طول دوره‌ی که نیاز بر اساس آن سنجیده می‌شود تعریف گردد:

$$0 \leq Vul^j \leq 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T;$$

$$Vul^j = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t^j / D_t^j > 0)}{\left[ \frac{T}{N} (D_t^j > 0) \right] \sum_{t=1}^T Demand} \times 100\% \quad (3)$$

برگشت‌پذیری: نسبت تعداد گام‌های زمانی که در طول دوره شبیه‌سازی، سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب تغییر کرده به تعداد کل گام‌های زمانی که در آن‌ها سیستم با کمبود مواجه بوده است را برگشت‌پذیری گویند (Sandoval-Solis and McKinney, 2011).

$$0 \leq Res^j \leq 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T;$$

$$Res^j = \frac{\sum_{t=1}^T N (D_{t+1}^j = 0 / D_t^j > 0)}{\sum_{t=1}^T N (D_t^j > 0)} \times 100\% \quad (4)$$

که در آن  $N()$  تعداد گام‌های زمانی در طول دوره مطالعاتی است که شرط داخل پارانتر در آن اتفاق افتاده است.

شاخص پایداری: شاخص پایداری جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در مقایسه و تصمیم‌گیری بین گزینه‌های مختلف مدیریت و برنامه‌ریزی می‌باشد و براساس معیارهای عملکرد زیر تعریف می‌گردد (Sandoval-Solis and McKinney, 2011):

## ۵-۲- شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های متنوعی برای ارزیابی سناریوها مورد استفاده قرار گرفته شده است که در ادامه تشریح می‌شوند:

اطمینان‌پذیری زمانی: نسبت تعداد گام‌های زمانی را که نیاز مصرف‌کننده در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تأمین شده است را به کل دوره شبیه‌سازی را اطمینان‌پذیری زمانی گویند (McMahon et al., 2006).

$$0 \leq Rel_{time}^j \leq 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T;$$

$$Rel_{time}^j = \frac{N_s}{T} \times 100\% \quad (1)$$

که در آن  $N_s$  نشان‌دهنده تعداد گام‌های زمانی است که نیاز مصرف‌کننده زام به طور کامل تأمین شده یا کمبود آب برابر صفر است ( $D_t=0$ ), تعداد کل گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی یا دوره مورد بررسی می‌باشد.

اطمینان‌پذیری حجمی: نسبت حجم آب تأمین شده مصرف‌کننده زام به حجم آب مورد نیاز آن در طول دوره شبیه‌سازی یا دوره مورد بررسی می‌باشد (Hashimoto et al., 1982).

$$0 \leq Rel_{Vol}^j \leq 100\%$$

$$Rel_{Vol}^j = \frac{\sum_{t=1}^{t=N} Supply_t^j}{\sum_{t=1}^{t=N} Demand_t^j} \times 100\% \quad (2)$$

که در آن،  $Supply$  حجم آب تأمین شده مصرف‌کننده زام و  $Demand$  حجم آب مورد نیاز آن مصرف‌کننده زام می‌باشد.

آسیب‌پذیری: نشان‌دهنده شدت و یا بزرگی شکست سیستم است (Hashimoto et al., 1982). آسیب‌پذیری به عنوان نسبت مجموع



(Ashraf Vaghefi et al., 2017b). نسخه مورد استفاده در این مطالعه دارای تفکیک مکانی ۰/۵ درجه در ۰/۵ درجه می‌باشد.

$$SI^j = \left\{ Rel_{time}^j \times Res^j \times (1 - Vul^j) \right\}^{1/3} \times 100\% \quad (5)$$

### ۶-۲- سناریوهای تغییر اقلیم

برای ارزیابی سناریوهای از مدل‌های مدل گردش جهانی (GCM<sup>d</sup>) استفاده شده است. (Teutschbein and Seibert 2012) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که استفاده از چندین مدل تغییر اقلیم نتایج بهتری را حاصل می‌کند. در جدول ۱ مدل‌های تغییر آب و هوایی با ذکر منبع آورده شده است. در این مطالعه از ۵ مدل GCM و چهار سناریو RCP<sup>5</sup> برای مدل‌سازی اثر تغییر اقلیم که شامل اطلاعات بارش و دماست، استخراج و وارد مدل SWAT شد

### ۷-۲- معرفی پایگاه داده اقلیمی جهانی CRU<sup>6</sup>

همانگونه که اشاره شد، بدلیل عدم دسترسی به داده‌های زمینی افغانستان از اطلاعات پایگاه جهانی استفاده به عمل آمد. مدل CRU یک مدل شبیه‌سازی دینامیکی است و از حداکثر داده‌های هواشناسی زمینی ثبت شده در سطح جهان بهره می‌برد. این پایگاه علاوه بر قدرت تفکیک مکانی بالا، دوره زمانی بلندمدت‌تری را نسبت به سایر داده‌های جهانی پوشش می‌دهد. موقعیت مکانی شبکه CRU برای بخشی از حوضه آبریز سد دوستی در شکل ۴ نشان داده شده است.

Table 1<sup>a</sup>- GCMs model at 0.5 grid for maximum and minimum temperature and precipitation  
جدول ۱- مدل GCM برای دمای بیشینه و کمینه با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه

	Models	Scenarios <sup>b</sup>	Source
GCM1	GFDL-ESM2M	RCP(2.6,4.5,6.0,8.5)	NOAA/Geographical Fluid Dynamics Laboratory
GCM2	HadGEM2-ES	RCP(2.6,4.5,6.0,8.5)	Met Office Hadley Center
GCM3	IPSL-CM5A-LR	RCP(2.6,4.5,6.0,8.5)	L'Institute Pierre-Simon Laplace
GCM4	MIROC	RCP(2.6,4.5,6.0,8.5)	AORI,NIES and JAMSTEC
GCM5	NoerESM1-M	RCP(2.6,4.5,6.0,8.5)	Norwegian Climate Center
	CRU		Climate Research Unit East Anglia

a (Ashraf Vaghefi et al., 2017b)

b GCMs are available from 2006 to 2099, and CRU are available from 1970 to 2005

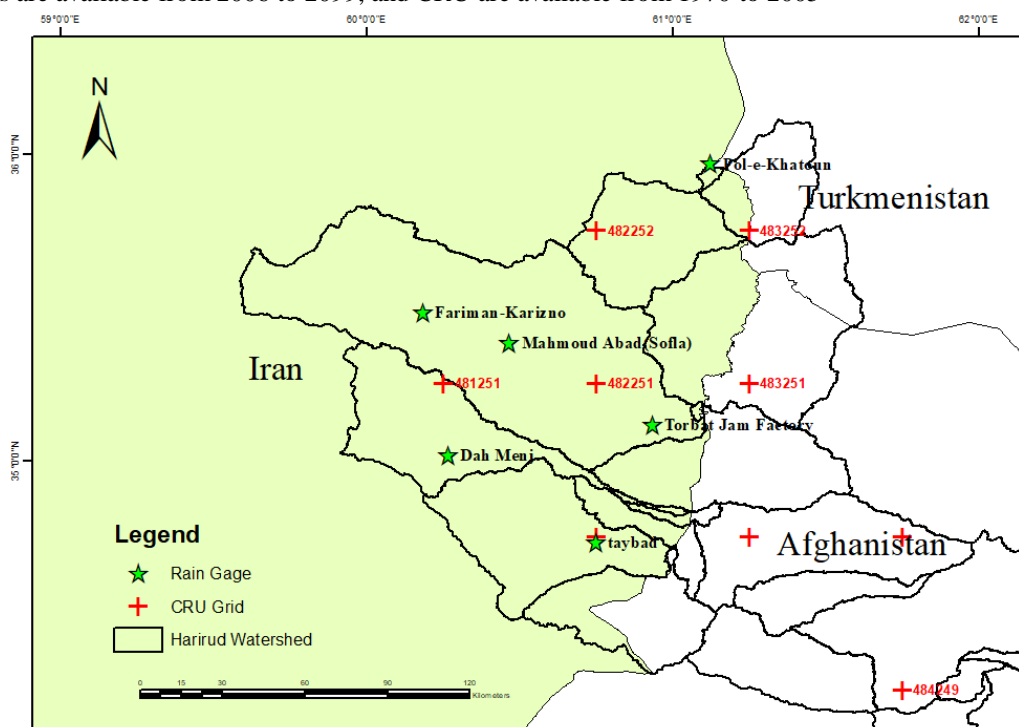


Fig. 4- Location of rain gage and CRU station in Iran  
شکل ۴- موقعیت ایستگاه‌های بارانسنجی و CRU در ایران

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ارزیابی داده‌های CRU

ارزیابی داده‌های CRU برای منطقه مطالعاتی نشان داد که میانگین بارش در سطح منطقه دارای اطلاعات بارش (بخش واقع در ایران-شکل ۴) و CRU به ترتیب ۲۶۷ و ۲۴۶ میلی‌متر است. همچنین توزیع ماهانه بارش‌ها با استفاده از دو منبع داده‌ها بری دوره آماری مشترک برای مناطق دارای آمار بارش برآورد و در شکل ۵ ارائه شده‌اند. همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و CRU برای ۳ ایستگاه به عنوان نمونه در شکل ۶ آورده شده است. همانطور که از شکل قابل ملاحظه است، عملکرد مناسب داده‌های CRU قابل صحت‌گذاری و تعمیم در کل حوضه آبریز می‌باشند.

#### ۳-۲- ساخت مدل‌های SWAT و WEAP حوضه آبریز هریرود

مهمترین اطلاعات برای آماده‌سازی مدل SWAT تهیه نقشه رقوم

ارتفاعی (DEM<sup>7</sup>) است که فایل مربوط از طریق سایت ناسا با تفکیک مکانی ۹۰ متر استخراج شد. اطلاعات مربوط به خاک منطقه از سایت FAO با تفکیک مکانی ۱۷ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفته است. نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز سد دوستی با تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر از سایت مهندسان ارتش آمریکا (USGS) استفاده شده است. در جدول ۲ اطلاعات ورودی به مدل SWAT سد دوستی با منبع داده‌ها قرار داده شده است.

شیب در حوضه آبریز سد دوستی بین بازه صفر تا ۶۷ درجه متغیر است به همین خاطر در ساخت مدل SWAT بازه شیب حوضه بین ۵ قسمت تقسیم شد. بر اساس داده‌های فوق مدل SWAT حوضه آبریز سد دوستی را به ۳۵ زیر حوضه و ۴۰۱ واحد هیدرولوژیکی تقسیم کرد. در جدول ۳ نیاز بخش‌های کشاورزی، شرب و زیست‌محیطی وارد شده در مدل WEAP آورده شده است.

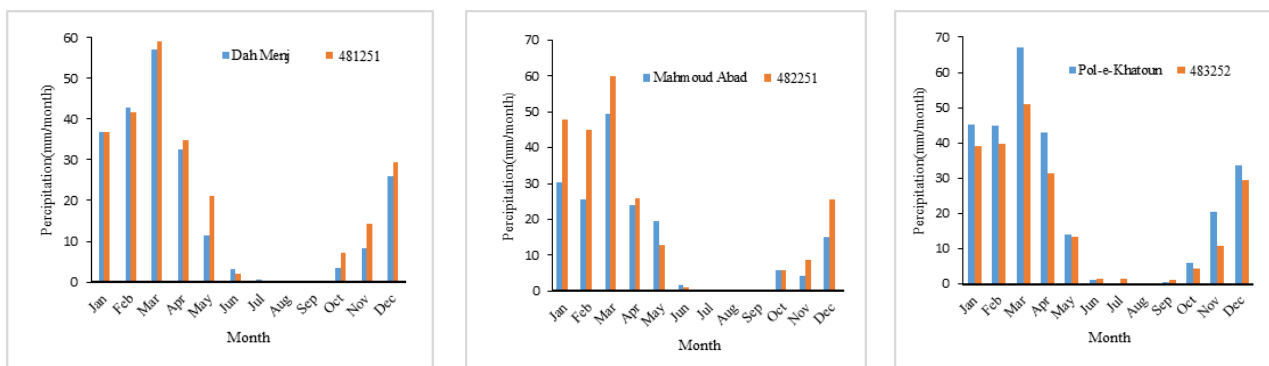


Fig. 5- Average monthly precipitation comparison between observed stations and CRU

شکل ۵- مقایسه متوسط بارش ماهانه ایستگاه‌های مشاهداتی و CRU

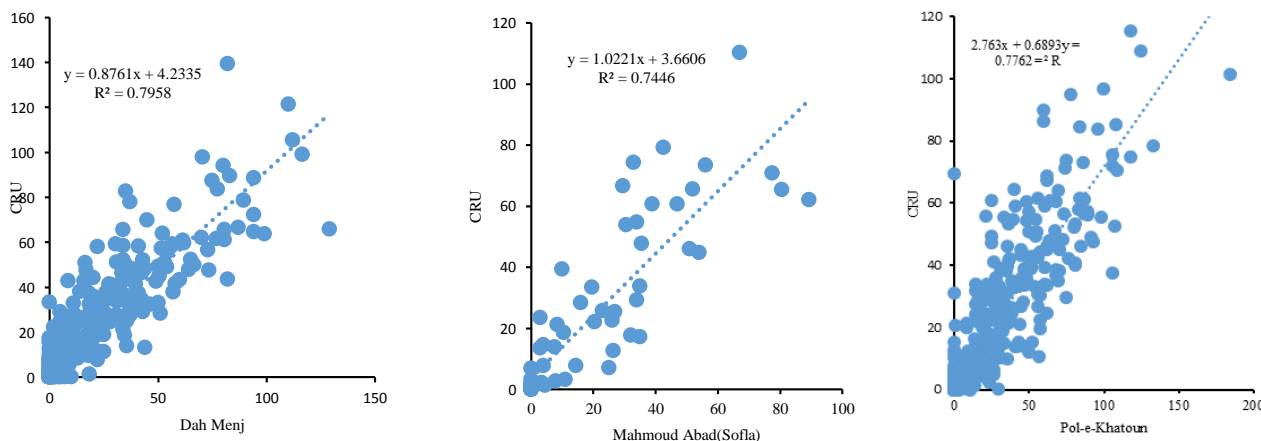


Fig. 6- Correlation graph of average monthly precipitation between CRU and observed station

شکل ۶- نمودار پراکنش میانگین ماهانه بارش داده‌های مشاهداتی و CRU

**Table 2- Data description and sources used in SWAT model**

جدول ۲- منابع اطلاعات استفاده شده در ساخت مدل SWAT

Data Type	Resolution	Source
Digital Elevation Model (DEM)	90 m	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/">http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/</a>
Soil	17 km	FAO-UNESCO global soil map <a href="http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/">http://www.fao.org/nr/land/soils/digital-soil-map-of-the-world/en/</a>
Land use	1000 m	Global Land use/Land Cover Characterization USGS <a href="http://landcover.usgs.gov/glcc/">http://landcover.usgs.gov/glcc/</a>
Climate	-	Climate Research Unit East Anglia <a href="http://www.cru.uea.ac.uk/data">http://www.cru.uea.ac.uk/data</a>
Hygrometry	-	Khorasan Razavi Regional Water Authority

**Table 3- Water demand in DRB**

جدول ۳- نیاز آبی در حوضه آبریز سد دوستی

Demand (MCM/year)	Allocation Source		
	Salma	Doosti	Inter-basin
Inter-basin Demand	-	-	400
Agricultural Demand of Afghanistan	560	-	-
Municipal Demand of Iran	-	150	-
Municipal Demand of Turkmenistan	-	150	-
Agricultural Demand of Iran	-	278	-
Agricultural Demand of Turkmenistan	-	278	-
Environmental Demand	211	128	-

(Thomas and Warner, 2015)

RCP2.6 کمترین تغییرات دما و سناریو RCP8.5 بیشترین تغییرات دمایی در حوضه آبریز سد دوستی را خواهند داشت. در تمامی سناریوها افزایش دما در بالادست سد سلما بیشترین مقدار را داراست (۲-۳/۸ درجه افزایش). در حالی که تغییرات دمایی در مناطق بین سد دوستی و سد سلما تغییرات دمایی به مراتب کمتری را تجربه خواهد کرد (از ۱/۶ تا ۳/۲ درجه افزایش).

تغییرات بارش تجمعی سالانه متوسط در دوره تاریخی بین ۳۹۳-۲۱۰ میلی‌متر در سال متغیر است (جدول ۴). که بارش از حدود ۳۹۰-۳۵۰ میلی‌متر در سال در ارتفاعات هندوکش در بالادست حوضه سد دوستی شروع و با یک روند نزولی به کمترین مقدار خود در مناطق پست هرات و ورودی سد دوستی با بارشی در حدود ۲۴۷-۲۱۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. در سناریو RCP 2.6 بارش در مناطق شرقی و بالادست سد سلما در حدود ۲۶ درصد کاهش را شاهد خواهد بود که این کاهش در محل ورودی سد سلما شدیدتر است. بررسی روند تغییرات متوسط بارش تجمعی سالانه در حوضه آبریز سد دوستی تحت سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به متوسط بارش تجمعی سالانه دوره تاریخی نشان داد که هر چه میزان انتشار گاز کربن بیشتر باشد میزان کاهش بارش

نیاز زیست‌محیطی سلما شامل پایین دست سلما تا ورودی سد دوستی و نیاز زیست‌محیطی دوستی شامل پایین دست سد دوستی تا دشت سرخس است.

### ۳-۳- تغییرات دما و بارش در آینده

پارامترهای بسیار زیادی بر میزان بارش و دما تأثیرگذارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به CO<sub>2</sub> اشاره کرد. سناریوهای تغییر اقلیم بر اساس کاهش یا افزایش گازهای گلخانه‌ای و افزایش جمعیت استوارند. در این بخش محدوده تغییرات ۵ مدل GCM مورد استفاده (جدول ۴) تحت سناریوهای مختلف با شرایط موجود حوضه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی روند تغییرات دما تحت سناریوهای تغییر اقلیم نشان می‌دهد که حوضه آبریز سد دوستی در سال‌های آتی شرایط گرمتری را نسبت به دوره تاریخی تجربه خواهد کرد. مطابق جدول ۴ در سناریو RCP 2.6 دمای متوسط حوضه آبریز سد دوستی، بین ۱/۶۷ تا ۲ درجه افزایش خواهد یافت. مناطق شرقی و جنوب شرقی بیشترین افزایش دما و پایین دست حوضه کمترین افزایش را نشان می‌دهد. بررسی روند تغییرات دما در حوضه سد دوستی تغییرات دمایی بین ۱/۶ تا ۳/۸ درجه سانتیگراد طی سال‌های آینده را نشان می‌دهد. سناریو



دوستی و سلما) در جدول ۷ آورده شده است. مطابق جدول، در بالادست سد سلما با توجه به افزایش دما و کاهش بارش و ذخیره برف در مناطق کوهستانی پشتو تحت سناریوهای تغییر اقلیم رواناب ورودی به سد سلما کاهش معناداری را تجربه می‌کند به طوری که در میان سناریو RCP 8.5 به کمتر از ۶۰ درصد مقدار کنونی می‌رسد. در میان حوضه بین سد دوستی و سد سلما هم علی‌رغم افزایش دما، میانگین بارش افزایش داشت که موجب افزایش دبی ورودی در حدود ۱۶ درصد شده است.

شکل ۷ طرح شماتیک از مدل WEAP را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری زمانی و حجمی و شاخص پایداری تحت شرایط وجود و عدم وجود سد سلما و همچنین سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در جدول ۸ و جدول ۹ آورده شده است. همچنین به جهت اینکه بتوان درک ملموس‌تری از وضعیت حاصل تحت شرایط مختلف داشت، شاخص پایداری بصورت جداگانه در قالب نمودار ستونی ترسیم شده که نتیجه آن در شکل ۸ نشان داده شده است.

سد دوستی بر اساس معاهداتی که بین کشور ایران و ترکمنستان وجود داشته احداث شده است. براساس توافق ۲ کشور سهم هریک از طرفین در احداث، بهره‌برداری و استفاده از آب و انرژی سد به صورت برابر است (Thomas and Warner, 2015). بر همین اساس در وضع موجود تأمین آب بخش شرب و کشاورزی و زیست‌محیطی پایین‌دست سد دوستی با اطمینان‌پذیری بالا و آسیب‌پذیری پایین انجام می‌گیرد (جدول ۸). این موضوع نشان‌دهنده این است که طراحی سد دوستی بر اساس کل پتانسیل آورد رودخانه صورت پذیرفته است. به موجب فقدان توافق‌نامه در خصوص تقسیم آب هریرود بین ایران و افغانستان، دولت افغانستان اقدام به احداث سد سلما بر روی سرشاخه رودخانه هریرود کرده است.

شدیدتر در حوضه تجربه خواهد شد (در حدود ۳۵ درصد کاهش بارش). در مناطق غربی و ورودی سد دوستی که کم‌ترین میزان بارش در دوره تاریخی را دارند تحت سناریوهای RCP 2.6 تا RCP 8.5 همین الگوی کاهش را شاهد خواهد بود. مناطق مرکزی و گوشه شمال غربی حوضه آبریز سد دوستی که دارای بارش متوسط بیش‌تر نسبت به سیر نقاط تحت سناریوهای RCP 2.6 تا RCP 8.5 همواره با افزایش بارش مواجه بودند که سناریو RCP 2.6 با ۱۶ درصد بیشترین و سناریو RCP 8.5 با ۲ درصد کم‌ترین مقدار افزایش بین سناریوهای تغییر اقلیم مدل جهانی آب و هوایی را خواهند داشت.

### ۳-۴- تحلیل حساسیت و صحت‌سنجی مدل SWAT

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT در SUFI-2، ۲۱ پارامتر به عنوان پارامترهایی که بایستی مورد واسنجی قرار گیرند، شناخته شدند. در بین پارامترهای وارد شده برای صحت‌سنجی پارامتر عدد منحنی حوضه (CN2) حساس‌ترین پارامتر و بعد از آن پارامترهای مربوط به دمای ذوب برف، نفوذپذیری و آب زیرزمینی قرار داشتند. پارامتر دبی پایه هم کم‌ترین حساسیت را در بین پارامترهای وارد شده دارا بودند. در جدول ۵، تمامی ۲۱ پارامتر اولیه به همراه توضیحات آن‌ها آورده شده است که بر اساس میزان حساسیت‌پذیری مرتب شده‌اند (ستون ۱ جدول). در ستون‌های انتهایی جدول بازه اولیه و سپس بازه نهایی پارامترها به ترتیب قبل و بعد از کالیبراسیون آورده شده است.

شاخص‌های ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۶ ارائه شده‌اند. با توجه به این نتایج، شبیه‌سازی جریان در حوضه آبریز سد دوستی با استفاده از مدل SWAT در طبقه‌بندی "خوب" قرار دارد (Havrylenko et al., 2016).

### ۳-۵- ارزیابی تغییرات ورودی به سد دوستی

رواناب ورودی به سد سلما و جریان ورودی از میان حوضه (بین سد

Table 4- Comparison of rainfall and temperature changes (%) in the current condition with climate change scenarios

جدول ۴- مقایسه درصد تغییرات بارش و دما (%) در وضع موجود با سناریوهای تغییر اقلیم

	Precipitation		Temperature	
	Max	Min	Max	Min
Current Condition (mm/°C)	393	210	17.86	5.07
Diff RCP 2.6 (%)	-26.5	16	2.01	1.67
Diff RCP 4.5 (%)	-29.2	12.9	2.7	2.22
Diff RCP 6.0 (%)	-31.3	8.5	2.7	2.33
Diff RCP 8.5 (%)	-35.8	2	3.8	3.27

**Table 5- Parameters assessed in SWAT model**

جدول ۵- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT

Rate	Parameter Name	Definition	Initial Range	final Range
1	r__CN2.mgt	SCS runoff curve number f	-0.2-0.2	-0.23-(-0.086)
2	v__SFTMP.bsn	Snowfall temperature	-20-20	-24.74-(-13.62)
3	v__SMTMP.bsn	Snow melt base temperature	-20-20	0.72-11.01
4	v__GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient	0-0.2	0.12-0.22
5	r__SOL_AWC(..).sol	Available water capacity of the soil layer	-0.2-0.4	0.41-0.65
6	v__CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	5-130	11.65-17.87
7	v__RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction	0.3-0.45	0.37-0.44
8	v__HRU_SLP.hru	Average slope steepness	0.8-1	0.44-0.61
9	r__SOL_K(..).sol	Saturated hydraulic conductivity	-0.8-0.8	0.02-0.28
10	v__ALPHA_BNK.rte	Baseflow alpha factor for bank storage	0-1	0.2-0.4
11	v__ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor	0.8-1	0.85-0.93
12	v__GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0-2	80-120
13	r__SOL_BD(..).sol	Moist bulk density.	-0.5-0.6	-0.69-(-0.16)
14	v__SMFMN.bsn	Minimum melt rate for snow during the year (occurs on winter solstice)	0-20	3.41-11.27
15	v__REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	10-200	82.44-118.11
16	v__GW_DELAY.gw	Groundwater delay (days)	30-450	234.98-502.69
17	v__SLSUBBSN.hru	Average slope length	10-15	11.65-13.63
18	v__CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel	0-0.3	0.16-0.33
19	v__OV_N.hru	Manning's "n" value for overland flow	0.05-0.12	0.09-0.12
20	v__SMFMX.bsn	Maximum melt rate for snow during year (occurs on summer solstice)	0-20	-5.36-2.36
21	v__ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor (days)	0-1	-0.55-(-0.05)

**Table 6- Calibration (1955-1996) and validation (1997-2016) performance of Doosti River Basin**

جدول ۶- نتایج دوره واسنجی (۱۹۹۷-۱۹۵۵) و دوره صحت‌سنجی (۲۰۱۶-۱۹۹۷) رواناب در حوضه آبریز سد دوستی

	NS	R <sup>2</sup>	P factor	R factor
Calibration	0.65	0.66	0.75	1.20
Validation	0.70	0.72	0.78	1.02

**Table 7- Inflow of Salma and inter-basin in historic and future scenarios**

جدول ۷- جریان ورودی به سد سلما و میان حوضه در دوره تاریخی و سناریوهای آینده

	Inflow to Salma	Inflow to Inter-basin
Historical Inflow(MCM/year)	1081	400
RCP 2.6 Inflow(MCM/year)	810	464
RCP 4.5 Inflow(MCM/year)	738	452
RCP 6.0 Inflow(MCM/year)	726	436
RCP 8.5 Inflow(MCM/year)	614	408

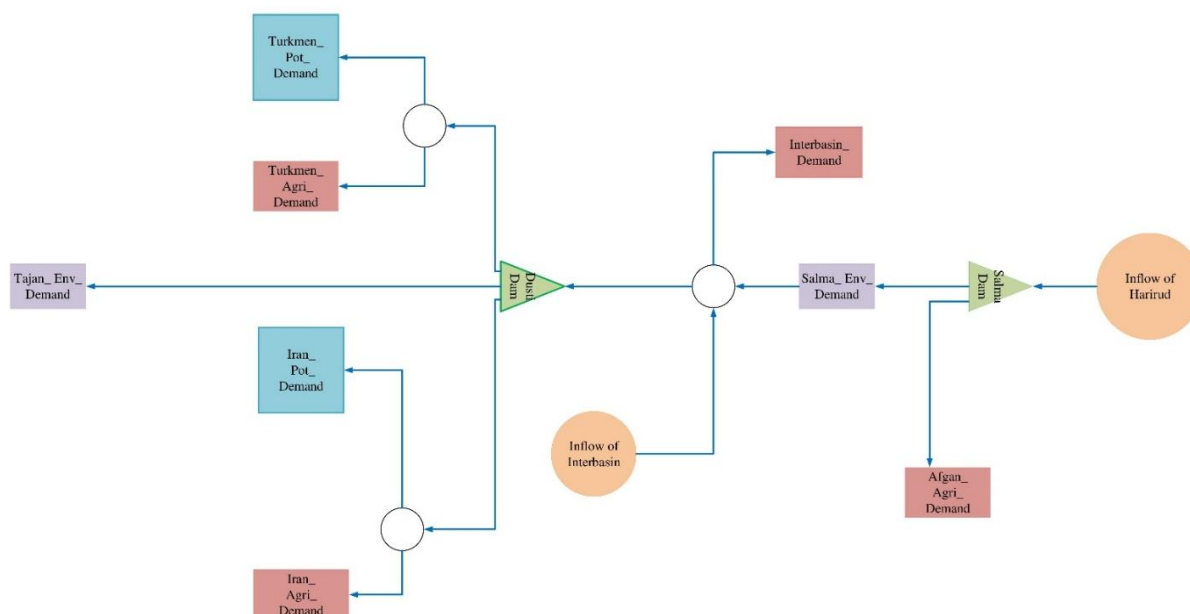


Fig. 7- Schematic model of water allocation in WEAP model  
 شکل ۷- طرح شماتیک تخصیص آب در مدل WEAP

تغییر اقلیم در سناریوهای مختلف مقداری بین ۳۱/۷ درصد تا ۳۶/۲ درصد خواهد داشت. پایداری نیاز میان حوضه نیز از ۶۸/۶ درصد به ۵۱/۸ درصد کاهش یافته که در شرایط تغییر اقلیم به مقادیری بین ۳۱/۱ تا ۳۵ درصد کاهش خواهد یافت. بر اساس محاسبات انجام شده، با احداث سد دوستی از ۱۴۸۰ میلیون مترمکعب پتانسیل منابع آب حوضه آبریز دوستی، حدود ۸۵۰ میلیون مترمکعب آب سهم کشورهای ایران و ترکمنستان بود که با احداث سد سلما سهم هر کشور به ۱۵۰ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت.

با توجه به اینکه تحت شرایط آبی تأمین نیاز کشاورزی ایران و ترکمنستان از طریق سد دوستی با چالش عمده مواجه است، چنانچه فرض شود نیاز کشاورزی ایران و ترکمنستان از منبعی غیر از سد دوستی تأمین گردند و همچنین فرض شود که افغانستان اقدام به توسعه کشاورزی بیش از وضعیت موجود نکند (عدم ساخت سدهای بالا بلوک، پاشدان، کفگان، تیرپل)، این سؤال مطرح می‌شود که در این شرایط سد دوستی تا چند سال آینده توان تأمین آب شرب رو به رشد شهر مشهد را دارا می‌باشد؟ بر خلاف حالت‌های قبل که نیاز شرب ایران و ترکمنستان ثابت در نظر گرفته شد، در این حالت نیاز شرب متناسب با افزایش جمعیت متغیر در نظر گرفته شد. طبق منحنی شکل ۸ نیاز آبی شهر مشهد در افق ۱۴۲۰ با افزایش بیش از ۱/۵ برابری نسبت به شرایط کنونی مواجه خواهد شد (Thomas and Warner, 2015).

احداث سد سلما باعث شده است که به ترتیب آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، اعتمادپذیری حجمی و پایداری از مقادیر ۱۶/۹، ۵۱/۹، ۸۴/۱ و ۷۱/۸ به ۶۴/۷، ۱۱/۶، ۳۵/۳ و ۲۳ درصد تغییر می‌یابد. بنابراین، با توجه به این مساله آب تخصیص یافته به کشاورزی ایران و ترکمنستان با کاهش قابل توجهی مواجه است. با این وجود وقتی شرایط تغییر اقلیم نیز اضافه شود اعتمادپذیری حجمی در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم به ترتیب مقادیر ۴/۴، ۴/۱، ۲/۴ درصد را خواهند داشت و میزان پایداری هم به ۴/۸، ۴/۵، ۳/۹ و ۲/۷ درصد تنزل خواهد یافت. بنابراین تقریباً آبی جهت کشاورزی ایران و ترکمنستان باقی نخواهد ماند (جدول ۹ و شکل ۸) اما کشاورزی افغانستان با پایداری ۵۱/۸ درصد تأمین می‌گردد. همچنین احداث سد سلما اگرچه در شرایط فعلی تأثیری بر تأمین آب شرب ایران و ترکمنستان ندارد، اما در شرایط آینده و با توجه به وقوع تغییر اقلیم سبب می‌گردد تا پایداری تأمین شرب ایران و ترکمنستان به حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد در سناریوهای مختلف افت نماید.

همچنین دبی زیست‌محیطی پایین دست سد دوستی که تا قبل از احداث سد سلما مقدار ۶۸/۵ درصدی را دربر داشت، به عدد ۲۷/۵ درصد خواهد رسید. وقوع تغییر اقلیم نیز باعث می‌شود تا وضعیت وخیم‌تر گشته و میزان پایداری در سناریوهای مختلف در بازه ۱۱/۴ درصد تا ۱۴/۶ درصد متغیر باشد که یک خطر جدی محسوب می‌شود. دبی زیست‌محیطی برای پایین دست سلما که تا قبل از احداث آن دارای پایداری ۷۴/۳ درصد بود به ۴۸/۶ درصد کاهش می‌یابد که در صورت

Table 8- Vulnerability, resilience, reliability and sustainability index in current condition before and after the construction of Salma dam

جدول ۸- شاخص‌های آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری و پایداری قبل و بعد از احداث سد سلما

		Vulnerability	Resilience	Reliability of time	Reliability of Volume	Sustainability
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
		(a)	(b)	(c)	(d)	$((1-a)*b*c)^{1/3}$
Current Condition Without Salma Dam	Iran Agriculture	15.9	51.9	84.8	84.1	71.8
	Turkmenistan Agriculture	15.9	51.9	84.8	84.1	71.8
	Iran Municipal	0.0	100.0	100.0	100.0	100
	Turkmenistan Municipal	0.0	100.0	100.0	100.0	100
	Inter-basin Demand	7.3	41.0	84.9	92.7	68.6
	Salma Environment	2.3	43.0	97.7	97.7	74.3
	Tajan Environment	16.0	51.4	74.3	84.0	68.5
Current Condition With Salma Dam	Iran Agriculture	64.7	11.6	29.8	35.3	23.0
	Salma Agriculture	1.2	14.3	98.6	98.8	51.8
	Turkmenistan Agriculture	64.7	11.6	29.8	35.3	23.0
	Iran Municipal	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Turkmenistan Municipal	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Inter-basin Demand	1.2	14.3	98.6	98.8	51.8
	Salma Environment	15.4	20	68.0	84.6	48.6
Tajan Environment	36.2	11.4	28.7	63.8	27.5	

Table 1- Vulnerability, resilience, reliability and sustainability index after the construction of Salma dam under climate change scenarios

جدول ۱- شاخص‌های آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری و پایداری بعد از احداث سد سلما تحت سناریوهای تغییر اقلیم

	Vulnerability	Resilience	Reliability of time	Reliability of Volume	Sustainability
Demand	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
	(a)	(b)	(c)	(d)	$((1-a)*b*c)^{1/3}$
Iran Agriculture	95.0-97.6	2.1-3.8	3.8-5.8	2.4-5.0	2.7-4.8
Salma Agriculture	39.4-51.5	13.5-15.7	36.2-38.8	48.5-60.6	28.7-33.3
Turkmenistan Agriculture	95.0-97.6	2.1-3.8	3.8-5.8	2.4-5.0	2.7-4.8
Iran Municipal	4.8-15.1	11-13.7	84.2-95.0	84.9-95.2	42.9-49.9
Turkmenistan Municipal	4.8-15.1	11-13.7	84.2-95.0	84.9-95.2	42.9-49.9
Inter-basin Demand	38.8-51.1	15-17.6	41-46.4	48.9-61.2	31.1-36.9
Salma Environment	41.8-48.2	9.5-10.7	22.4-30.4	51.8-58.2	31.7-36.2
Tajan Environment	88.4-93	2.3-3.7	3.9-5.7	7-11.6	11.4-15.6

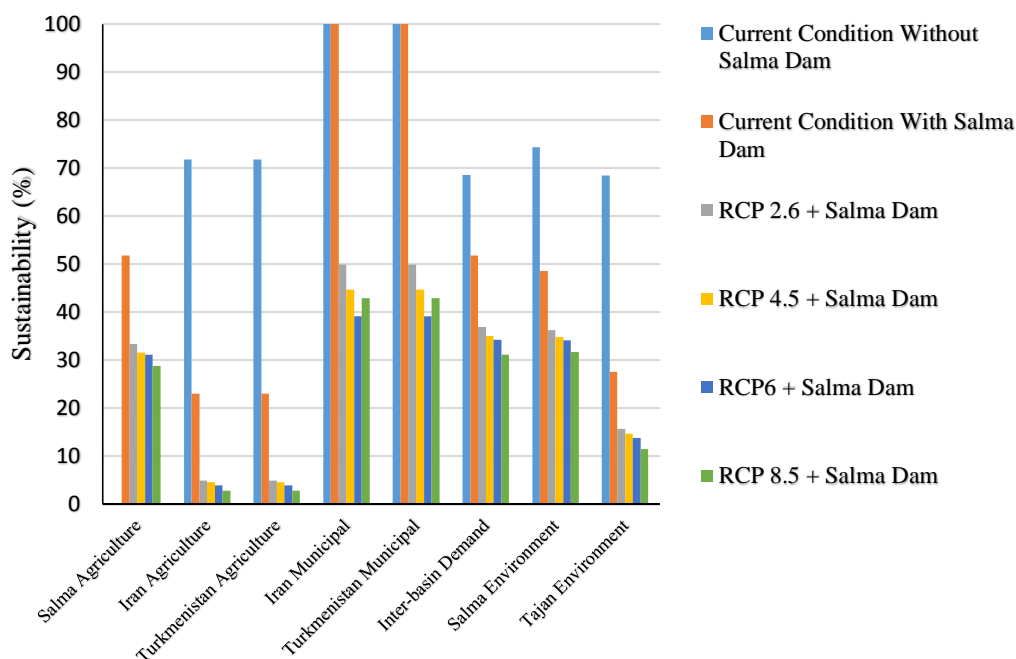


Fig. 8- Sustainability index in different situations

شکل ۸- شاخص پایداری برای شرایط مختلف

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله اثرات توسعه منابع آب در حوضه آبریز مرزی سد دوستی که بخش عمده آن در کشور افغانستان و فاقد اطلاعات پایه مناسب جهت تحلیل‌های هیدرولوژی است، انتخاب گردید. از این رو از داده‌های پایگاه‌های جهانی در کنار تحلیل‌های هیدرولوژیک و قضاوت‌های مهندسی برای بازسازی اطلاعات استفاده شد. نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه می‌باشد:

ارزیابی نتایج این حالت نشان داد که با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم در خوشبینانه‌ترین حالت (سناریو RCP 2.5) سد دوستی تنها تا سال ۱۴۱۵ قادر است تا به تأمین ۶۰ درصد نیاز آب شرب مشهد (ایران) با اطمینان پذیری ۸۵ درصد بپردازد و پس از آن میزان تأمین نیاز باید عدد ثابت ۲۳۸ میلیون متر مکعب بر سال با همان میزان اطمینان پذیری لحاظ شود (شکل ۸).

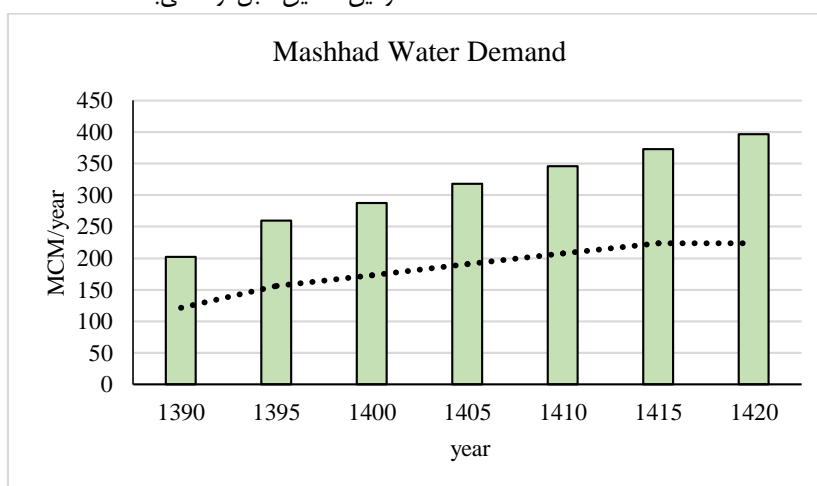


Fig. 9- Comparison of demand for Mashhad drinking water (green filled bars) and supplied water by Doosti dam (dotted line) in the coming years

شکل ۹- مقایسه میزان نیاز شرب مشهد (نمودار سبز رنگ ستونی) و میزان قابل تأمین از سد دوستی با اطمینان پذیری ۸۵ درصد (نمودار نقطه چین مشکی) در سال‌های آتی

۵- مراجع

- Abbaspour KC, Johnson CA and van Genuchten MT (2004) Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3(4):1340
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, Zobrist J and Srinivasan R (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2-4):413-430
- Adgolign TB, Rao GVRS and Abbulu Y (2016) WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management* 2(1):55-70
- Adhikari U and Nejadhashemi AP (2016) Impacts of climate change on water resources in Malawi. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers* 21(11):5016026
- Alaei M (2011) Water recycling in Mashhad plain (Effluent management: opportunities and threats). *ICID 21st International Congress on Irrigation and Drainage*, 15-25
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS and Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 34(1):73-89
- Ashraf Vaghefi S, Abbaspour K, Faramarzi M, Srinivasan R, and Arnold J (2017a) Modeling crop water productivity using a coupled SWAT-MODSIM model. *Water* 9(3):157
- Ashraf Vaghefi S, Abbaspour N, Kamali B and Abbaspour KC (2017b) A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions- Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software* 96:181-198
- Fereidoon M and Koch M (2018) SWAT-MODSIM-PSO optimization of multi-crop planning in the Karkheh River Basin, Iran, under the impacts of climate change. *Science of the Total Environment* 630:502-516
- Gain AK and Giupponi C (2015) A dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: An integrated approach. *Ecological Indicators* 48:120-131
- Gassman PW, Sadeghi AM and Srinivasan R (2014) Applications of the SWAT model special section: Overview and insights. *Journal of Environment Quality* 43(1):1

- بررسی اثرات آب و هوایی آینده بر حوضه آبریز سد دوستی نشان می‌دهد که افزایش دما به طور متوسط در حدود ۱/۵ تا ۳/۸ درجه خواهد بود که این تغییرات دمایی موجب کاهش بارش ۱۰۳ و ۱۴۲ میلی متر به ترتیب در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 می‌گردد.

- نتایج نشان داد که در شرایط پیش از احداث سد سلما، سد دوستی قادر به تأمین نیازهای پایین دست با اطمینان پذیری بالای ۹۰ درصد با درصد برگشت پذیری ۵۲ برای نیاز کشاورزی ایران و ترکمنستان و آسیب پذیری ۱۵ درصد است. احداث سد سلما موجب کاهش اطمینان پذیری بیش از ۵۰ درصدی تأمین آب ایران و ترکمنستان در بخش کشاورزی و زیست محیطی در غالب سناریوهای تغییر اقلیم خواهد شد که می‌تواند صدمات جبران ناپذیری را به اقتصاد و محیط زیست دشت سرخس وارد آورد. دلیل اینکه تاکنون تنش‌های جدی اجتماعی در دشت سرخس ناشی از عدم تخصیص آب طی سالهای اخیر مشاهده نشده، بالا بودن سطح آب زیرزمینی ناشی از آبیاری سالیان گذشته شبکه دوستی است. به مرور زمان و با برداشت از آبخوان، سطح آب زیرزمینی افت پیدا کرده و تنش آبی در دشت سرخس به یکی از چالش‌های اجتماعی و امنیتی در شمال شرق کشور تبدیل خواهد شد.

- بر اساس نتایج مدل سازی با احداث سد سلما، ۷۰ درصد منابع آب حوضه سهم کشور افغانستان و ۳۰ درصد مابقی سهم ایران و ترکمنستان خواهد شد. همچنین به موجب افزایش جمعیت و احداث سد سلما، سد دوستی در خوش بینانه ترین حالت امکان تأمین شرب شهر مشهد تا سال ۱۴۱۵ خواهد داشت. این نتایج مربوط به شرایطی است که دولت افغانستان برنامه توسعه رودخانه هریرود را در سال‌های آتی متوقف کند. در حالی که در شرایط خشکسالی شدید، مشابه سال‌های اخیر، حداکثر آب قابل تأمین برای شرب شهر مشهد در حدود ۸۵ میلیون متر مکعب می‌باشد.

- پژوهش حاضر و روش شناسی آن می‌تواند مبنایی برای تهیه یک سامانه پشتیبان در تصمیم گیری برای مذاکرات بین دو کشور (ایران و افغانستان) که قابلیت تحلیل سناریوهای مختلف را دارد، باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Water Evaluation And Planning System
- 2- Doosti River Basin
- 3- Hydrologic Response Unit
- 4- Global Circulation Model
- 5- Representative Concentration Pathways
- 6- Climatic Research Unit
- 7- Digital Elevation Model



- Nairizi S (2006) Integrated water resources management IWRM in critical arid basin or Iran (Mashhad basin). World Water Forum, 4. WWC, 1-31
- Narsimlu B, Gosain AK, and Chahar BR (2013) Assessment of future climate change impacts on water resources of upper Sind River Basin, India using SWAT model. Water Resources Management 27(10):3647-3662
- Neitsch S, Arnold J, Kiniry J, and Williams J (2011) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute 1-647
- Okungu J, Adeyemo J, and Otieno F (2017) Scenario analysis of water supply and demand using WEAP model: A case of Yala Catchment . Kenya 5(4):125-131
- Peterson S (2013) Why a dam in Afghanistan might set back peace. Christian Science Monitor
- Qiu L jing, Zheng F li, and Yin R S (2012) SWAT-based runoff and sediment simulation in a small watershed, the loessial hilly-gullied region of China: Capabilities and challenges. International Journal of Sediment Research. International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation and the World Association for Sedimentation and Erosion Research 27(2):226-234
- Rahman K, Maringanti C, Beniston M, Widmer F, Abbaspour K, and Lehmann A (2013) Streamflow modeling in a highly managed mountainous glacier watershed using SWAT: The upper Rhone River Watershed Case in Switzerland. Water Resources Management 27(2):323-339
- Sandoval-Solis S and McKinney DC (2011) Water planning and management for large scale river basins: Case of study of the Rio Grande/Rio Bravo transboundary basin. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin
- Shoghi Javan A, Ahmadi A (2019) A stability analysis of water sharing in transboundary rivers using game theory: A case study: Harirud River. Iran-Water Resources Research 14(4):108-119
- Teutschbein C and Seibert J (2012) Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology 456-457:12-29
- Thomas V and Warner J (2015) Hydropolitics in the Harirud/Tejen River Basin: Afghanistan as hydro-hegemon? Water International, Routledge 40(4):593-613
- Tibebe D and Bewket W (2011) Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Hajihoseini H, Hajihoseini M, Najafi A, Morid S, and Delavar M (2015) Assessment of the effect of land-use changes on streamflow in Helmand transboundary basin during 1990 to 2012 using remote sensed data & SWAT model. Iran-Water Resources Research 11(1):73-86
- Hashimoto T, Stedinger JR, and Loucks DP (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria. Water Resources Research 18(1):14-20
- Havrylenko SB, Bodoque del Pozo JM, Srinivasan R, Zucarelli G V, and Mercuri P (2016) Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. Catena, Elsevier B.V., 137:298-309
- Höllermann B, Giertz S, and Dieckrüger B (2010) Benin 2025-balancing future water availability and demand using the WEAP “Water Evaluation and Planning” system. Water Resources Management 3591-3613
- Huyen NT, Tu LH, Tram VNQ, Minh DN, Liem ND, and Loi NK (2017) Assessing the impacts of climate change on water resources in the srepek watershed, central highland of Vietnam. Journal of Water and Climate Change 8(3):524-534
- Ibisch R B, Bogardi J J, Borchardt D (2016) Integrated water resources management: Concept, research and implementation. Springer International Publishing, Switzerland
- Kumar N, Kumar S, Vikram S, Singh G, and Dzwaïro B (2018) Investigation of impacts of land use / land cover change on water availability of Tons River Basin, Madhya Pradesh, India. Modeling Earth Systems and Environment 4(1): 295-310
- Li X, Zhao Y, Shi C, Sha J, Wang ZL, and Wang Y (2015) Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) model for water resources management strategy estimation in coastal Binhai New Area, China. Ocean and Coastal Management 106:97-109
- Maliehe M and Mulungu DMM (2017) Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho. Physics and Chemistry of the Earth 100:305-316
- McMahon TA, Adeloje AJ, and Zhou SL (2006) Understanding performance measures of reservoirs. Journal of Hydrology 324(1-4):359-382
- Moriasi DN, Arnold JG, Liew MW Van, Bingner RL, Harmel RD, and Veith TL (2007) M e g s q a w s. 50(3):885-900
- Moshfegh A, Moridi A, Attari J (2019) Water resource planning based on the sovereignty doctrines in sharing transboundary water resources. Iran-Water Resources Research 14(4):86-95

Zhu X, Zhang C, Qi W, Cai W, Zhao X, and Wang X (2018) Multiple climate change scenarios and runoff response in Biliu River. *Water (Switzerland)* 10(2):1-17

Keleta Watershed, Ethiopia. *Land Degradation and Development* 22(6):551-564

Yates D, Sieber J, Purkey D and Huber-Lee A (2005) WEAP21- A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International* 30(4):487-500