

اثر تغییر اقلیم بر دبی ورودی و حجم مخزن سد درودزن، شمال استان فارس

مصطفی نادری^۱

استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷

چکیده

در این تحقیق دبی ورودی به سد درودزن تحت شرایط تغییر اقلیم توسط مدل SWAT پیش‌بینی شده است. داده‌های روزانه بارش و دمای ۲۲ مدل گردش عمومی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای ۵ ایستگاه هواشناسی توسط مدل آماری LARS-WG و به روش فاکتور تغییرات تدریجی ریزمقیاس شده‌اند. متوسط بارش سالیانه از ۷۵۱ میلی‌متر به ۶۵۳، ۶۲۴ و ۶۳۰ میلی‌متر تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش خواهد یافت (۱۳، ۱۷ و ۱۶ درصد). افزایش متوسط دمای سالیانه (۱/۷ تا ۳/۳ درجه) باعث افزایش تبخیر و تعرق واقعی (۱۳/۶ تا ۱۶ درصد) در سه سناریو خواهد شد. متوسط سالیانه دبی ورودی به سد از ۲۸/۶ به ۱۴/۹، ۱۴/۲ و ۱۴/۳ متر مکعب در ثانیه تحت سه سناریو کاهش خواهد یافت (۴۸ تا ۵۰ درصد). متوسط ماهانه حجم مخزن از ۴۹۰ به ۳۳۲، ۳۵۰ و ۲۴۷ میلیون متر مکعب و دبی خروجی از سد نیز از ۶۰ به ۴۵/۳، ۳۴ و ۳۵/۹ میلیون متر مکعب در ماه کاهش خواهد یافت که به دلیل کاهش ۱۲۷ میلی‌متر بارش سالیانه (۱۷ درصد) و افزایش ۶۵ میلی‌متر تبخیر و تعرق سالیانه (۱۶ درصد) در حوضه آبریز سد می‌باشد. کاهش حجم مخزن سد باعث تشدید بحران آب در مناطق پایین دست نیز خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، سد درودزن، رودخانه کر، منابع آب.

*نویسنده مسئول: مصطفی نادری

E-mail: m.naderi@iasbs.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

و دارای حجم ذخیره نرمال ۹۶۰ میلیون متر مکعب می‌باشد. سد از نوع سدهای خاکی چندمنظوره بوده و جهت تولید انرژی برق-آبی، کنترل سیلاب، تأمین آب شرب شهرهای شیراز، مرودشت و زرقان و تأمین آب کشاورزی برای حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع از اراضی پایین‌دست ساخته شده است. مطالعه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی برای یک دوره ۴۰ ساله (۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰) در حوضه سد درودزن نشان داد که هر دو شاخص خشکسالی در طی این دوره روندی افزایشی داشته‌اند و پیشنهاد داده شد که به منظور کاهش شدت بیابان‌زایی در بخش‌های میانی حوزه با مدیریت بهینه آب اثرات خشکسالی تعدیل و تنظیم شود (سهیلی و همکاران، ۱۳۹۶). مطالعه اثر خشکسالی بر روی دبی ورودی به سد درودزن توسط رنجبر و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد که دبی ورودی به سد تحت تأثیر عوامل اقلیمی مانند خشکسالی قرار دارد. صف شکن و همکاران (۱۳۹۶) اثر تغییر اقلیم بر روی دبی ورودی به سد درودزن را برای دو دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۳۸ و ۲۰۳۹ تا ۲۰۶۱ با استفاده از مدل گردش عمومی تحت دو سناریوی B1 و A2 بررسی کردند و دریافتند که دبی ورودی به سد تا ۲۸٪ در آینده کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه نتایج مدل‌های گردش عمومی دارای عدم قطعیت بسیاری است. لذا در مطالعات تغییر اقلیم باید از نتایج چندین مدل گردش عمومی استفاده شود. همچنین سناریوهای B1 و A2 (همچنین A1B) در مطالعات کنونی فاقد اعتبار بوده و سازمان بین‌المللی تغییر اقلیم سناریوهای جدیدی را تحت عنوان سناریوهای معرف غلظت گازهای گلخانه‌ای (Representative Concentration Pathways) یا همان RCP ارائه نموده است. با توجه به معایب ذکر شده در مطالعه تغییر اقلیم بر روی سد درودزن که توسط صف شکن و همکاران (۱۳۹۶) انجام شده، در این تحقیق سعی شده است تا مطالعه دقیق‌تری در این زمینه با رعایت موارد زیر صورت پذیرد: (۱) در این مطالعه از نتایج مدل گردش عمومی استفاده شده تا عدم قطعیت در پیش‌بینی و نتایج مدل‌های تغییر اقلیم برای محدوده مورد مطالعه کاهش یابد؛ (۲) اثر تغییر اقلیم تحت سه سناریوی جدید سازمان بین‌المللی تغییر اقلیم بررسی شده است که شامل سناریوی حد پایین گرمایش (RCP2.6)، حد میانی (RCP4.5) و حد نهایی (RCP8.5) می‌باشد؛ (۳) در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از قابلیت مدل SWAT، مؤلفه‌های جریان که شامل دبی پایه و رواناب هستند جداگانه کالیبره و سپس پیش‌بینی گردند. این امر برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب بسیار مهم است، زیرا تقریباً تمامی مصارف و برداشت

امنیت آب شیرین مورد نیاز بشر در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، افزایش تقاضای آب و تغییر در روش زندگی و رفاه اجتماعی ممکن است به خطر بیفتد (Rodrigues et al., 2014). بارش مهم‌ترین منبع آب شیرین در هر منطقه بوده و ممکن است تحت تأثیر اقلیم کاهش یابد که این امر موجب کاهش آب شیرین قابل دسترس (سطحی و زیرزمینی) در آینده خواهد شد (Mishra and Singh, 2010). بنابراین به نظر می‌رسد که بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی منابع آب جهت مدیریت پایدار این منابع بسیار ضروری است. حجم آب ذخیره شده در مخزن سدها از منابع مهم آب شیرین می‌باشد که از آن در دوره‌های خشک استفاده می‌شود. مطالعات زیادی اثر تغییر اقلیم بر روی آب ورودی به مخزن سد و تغییرات حجم مخزن بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال Mohammed and Scholz (2017) اثر تغییر اقلیم بر روی دبی ورودی به مخزن سد دوکان (Dokan) را در عراق بررسی کردند و دریافتند که کاهش ۴۰ درصدی بارش و افزایش ۳۰ درصدی تبخیر و تعرق در آینده باعث کاهش حدود ۶۰ درصدی دبی ورودی به سد خواهد شد. آبدهی مطمئن سد ستارخان در حوضه آبریز اهرچای با کاهش ۱۱ تا ۳۲ درصدی روبرو خواهد شد (کاراموز و همکاران، ۱۳۸۸). قدمی و همکاران (۱۳۹۷) اثر تغییر اقلیم بر دبی رودخانه سزار را توسط مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوی A2 بررسی نمودند و دریافتند که به دلیل افزایش دما (۱/۷ درجه سانتی‌گراد) و کاهش بارش (۲۴٪) در آینده مقدار دبی رودخانه تا ۲۹٪ کاهش خواهد یافت. مطالعه تغییر اقلیم در حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود در اصفهان نشان داد که دبی ورودی به سد چادگان در آینده حدود ۵/۸ درصد کاهش خواهد یافت که دلیل آن افزایش دما تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۱۶ درصدی بارش می‌باشد (مساح بوانی و مرید، ۱۳۸۴). مطالعه تغییر اقلیم توسط رامک و همکاران (۱۳۹۴) در حوضه آبریز رودخانه کارون نشان داد که حداکثر بارش محتمل حوضه در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ نسبت به دوره کنونی تحت سناریوی A1B حدود ۵٪ کاهش و تحت سناریوهای B2 و A1 به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ افزایش خواهد یافت.

جنوب مرکزی ایران عمدتاً دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک بوده و در سال‌های اخیر وقوع خشکسالی‌های شدید و پی‌درپی و از طرف دیگر اضافه برداشت از منابع آب در این ناحیه موجب تشدید کم‌آبی و ایجاد بحران آب گردیده است. سد درودزن در شمال استان فارس بر روی رودخانه کر ساخته شده

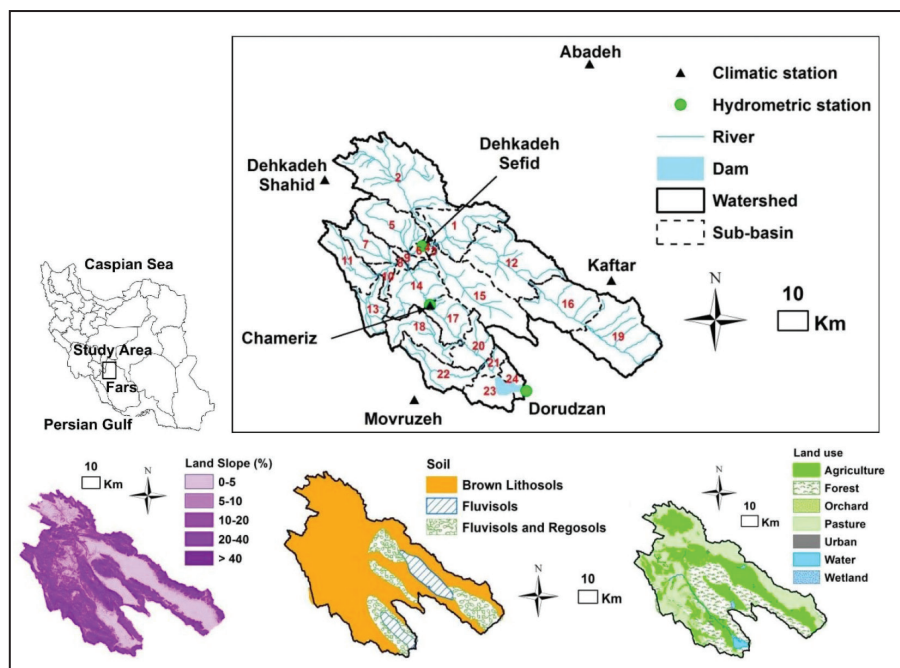
طی دوره ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۵ اندازه‌گیری شده است. متوسط دبی سالیانه در ایستگاه‌های هیدرومتری مذکور به ترتیب ۴/۴۳، ۶/۵، ۲۵/۴ و ۲۸/۶ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. در محدوده مورد مطالعه ۵ ایستگاه هواشناسی شامل آباده، کافترا، موروزه، چمریز و دهکده شهید وجود دارد که برای مطالعه تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. متوسط بارش سالیانه در حوضه آبریز برای دوره ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۵ بین ۶۷۷ تا ۸۵۵ میلی‌متر تغییر می‌کند و متوسط بارش بر روی کل حوضه آبریز ۷۵۱ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۲). اگر چه مناطق شرقی حوضه آبریز ارتفاع بیشتری دارند ولی مناطق غربی و جنوب غربی دارای بارش بیشتری هستند که به دلیل اثر بارش‌های مدیترانه‌ای و سودانی است که به ترتیب از شمال غرب و جنوب غرب وارد منطقه می‌شوند (Alijani and Harman, 1985; Beyglou et al., 2009). سد ملاصدرا در بالادست حوضه آبریز سد درودزن وجود دارد که از سال ۲۰۰۷ بهره‌برداری شده است. متوسط دبی ورودی و خروجی سد ملاصدرا طی دوره بهره‌برداری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ برابر ۶/۲ و ۷ مترمکعب در ثانیه است.

آب رودخانه از دبی پایه تأمین می‌شود نه دبی کل رودخانه. بنابراین دبی پایه رودخانه تعیین‌کننده میزان آب قابل دسترس برای مصارف بخش کشاورزی و صنعت است.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال استان فارس (عمدتاً اقلیم خشک و نیمه‌خشک) قرار دارد (شکل ۱). سد درودزن با مساحت حوضه آبریز ۴۳۰۴ کیلومتر مربع بر روی رودخانه کر واقع شده است و آب مورد نیاز کشاورزی برای حدود ۱۱۰۰ کیلومتر مربع از اراضی پایین‌دست و همچنین قسمتی از آب شرب و مصارف صنعتی در شهرهای شیراز، مرودشت و زرقان را تأمین می‌کند. کنترل سیلاب رودخانه کر و تولید انرژی برق-آبی نیز از سایر اهداف ساخت سد می‌باشد. تراز آب و حجم نرمال مخزن به ترتیب ۱۶۷۶/۵ متر از سطح دریا و ۹۶۰ میلیون مترمکعب در سال است. دبی روزانه رودخانه کر در ایستگاه‌های هیدرومتری دهکده سفید (سفید)، دهکده سفید (گاوگدار) و چمریز به همراه دبی ورودی به سد (ایستگاه درودزن روی شکل ۱) در

شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (بالا) و داده‌های ورودی به مدل SWAT (پایین).



۳- مواد و روش‌ها

۳-۱. مطالعه تغییر اقلیم

خواهد رسید و باعث خواهد شد که دمای متوسط کره زمین حدود ۱، ۱/۸ و ۳/۷ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۲۰۰۵ تا ۱۹۸۶ گرم‌تر شود. در نهایت میزان افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در این سه سناریو به گونه‌ای است که منجر به افزایش انرژی تابش خورشید در سال ۲۱۰۰ به مقدار ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ وات بر متر مربع نسبت به دوران انقلاب صنعتی خواهد شد (IPCC, 2014).

در این مطالعه از مدل آماری LARS-WG برای ریزمقیاس کردن نتایج ۲۲ مدل استفاده شده است. روش‌های آماری به دلیل قابلیت ریزمقیاس کردن تا حد ایستگاه، به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Fowler and Kilsby, 2007; Hay et al., 2002; Wilby et al., 2000; Wood et al., 2004). ایستگاه طی دوره ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۵ اندازه‌گیری شده ولی دمای مینیمم و ماکزیمم روزانه تنها در ایستگاه سینوپتیک آباده اندازه‌گیری شده است. بنابراین بارش در هر ۵ ایستگاه ولی دما برای ایستگاه آباده ریزمقیاس شد. داده‌های مشاهداتی بارش، دمای حداقل و حداکثر روزانه در ایستگاه‌ها برای دوره ۲۸ ساله از ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۵ به مدل LARS-WG داده و مدل بر این اساس برای هر ایستگاه کالیبره گردید. سپس

پیش‌بینی بارش توسط مدل‌های گردش عمومی مختلف دارای عدم قطعیت زیادی است. عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی بارش توسط مدل‌های مختلف عمدتاً به دلیل تفاوت در قدرت تفکیک مکانی آنها، پارامتری کردن فرایندهای فیزیکی غیر قابل حل و در نظر گرفتن یا نگرفتن گرمای نهان و آب شیرین است (Reichler and Kim, 2008). جهت کاهش این عدم قطعیت پیشنهاد می‌شود که از نتایج چندین مدل مختلف برای مطالعات تغییر اقلیم در یک منطقه استفاده شود (Dessai et al., 2005). در این مطالعه از داده‌های بارش و دمای روزانه ۲۲ مدل مربوط به پروژه Coupled Models Inter-comparison Project Phase 5 یا همان CMIP5 طی سال‌های ۲۰۲۶ تا ۲۰۸۵ استفاده شده است (جدول ۱). سازمان بین‌المللی تغییر اقلیم در سال ۲۰۱۴ سناریوهای جدیدی به نام سناریوهای معرف غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) ارائه داد که در آنها شرایط مختلف رشد اقتصادی، پیشرفت تکنولوژی، حفاظت محیط زیست، رشد جمعیت، جنگل زدایی، نوع انرژی مصرفی و حمل و نقل در نظر گرفته شده است و شامل سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 می‌باشد. در این سه سناریو یعنی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب متوسط جهانی غلظت گاز CO₂ در سال ۲۱۰۰ به ۴۲۰، ۵۵۰ و ۱۲۵۰ قسمت در میلیون

می‌گردند. فاکتور تغییر برای مقدار بارش، طول روزهای تر و خشک و انحراف از معیار میانگین دما به صورت نسبت مقادیر دوره آبی به مقادیر دوره مشاهداتی محاسبه می‌شود. فاکتورهای تغییر برای حداقل و حداکثر دما برابر با اختلاف بین مقادیر آبی و مشاهداتی است (Semenov and Barrow, 2002). در این مطالعه فاکتور تغییرات به صورت تدریجی (transient change factors) و برای هر سال بین دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۸۵ محاسبه شدند. بدین ترتیب که فاکتور تغییرات برای پنجره‌های زمانی ۵ ساله در آینده محاسبه شده و برای هر دوره فاکتور تغییرات به دست آمده برای سال مرکز آن دوره در نظر گرفته شده است. سپس هر پنجره به صورت بازه یک ساله به جلو حرکت داده شده و بدین ترتیب برای هر سال واقع شده در دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۸۵ فاکتورهای تغییرات آن سال به دست آمده است. بنابراین داده‌های روزانه بارش و دمای ۲۲ مدل برای ایستگاه اقلیمی در محدوده مورد مطالعه و برای دوره زمانی شامل سال‌های ۲۰۲۶ تا ۲۰۸۵ تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 ریزمقیاس گردید.

مدل LARS-WG برای هر ایستگاه با استفاده از ۲۸ سال داده‌های روزانه تولید شده صحت‌سنجی شد. جهت صحت‌سنجی، توزیع‌های آماری ماهانه بارش و دما و توزیع‌های آماری فصلی روزهای تر و خشک بین داده‌های تولید شده و مشاهداتی هر ایستگاه از طریق آزمون آماری کلموگراف-اسمیرنوف در سطح اطمینان ۹۹ درصد بررسی و مقایسه گردید. همچنین مقادیر میانگین ماهانه مربوط به بارش، دمای حداقل و حداکثر تولید شده نیز در هر ایستگاه توسط آزمون آماری t در سطح اطمینان ۹۹ درصد با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد (Semenov and Barrow, 2002). تمامی تست‌ها در این سطح اطمینان و در هر پنج ایستگاه اقلیمی مورد قبول واقع گردید. جهت ریزمقیاس کردن خروجی یک مدل گردش عمومی برای هر ایستگاه، نیاز به محاسبه فاکتور تغییرات می‌باشد. فاکتور تغییرات برای هر ایستگاه با توجه به سلول مدل گردش عمومی مورد نظر محاسبه می‌شود. فاکتورهای تغییرات از روی داده‌های مدل گردش عمومی برای هر ماه و هر سناریوی معین محاسبه

جدول ۱- لیست ۲۲ مدل CMIP5 مورد استفاده در این مطالعه.

Number	Model	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	Latitude resolution	Longitude resolution
۱	ACCESS1.0	--	✓	✓	۱/۲۵	۱/۸۷۵
۲	ACCESS1.3	--	✓	✓	۱/۲۵	۱/۸۷۵
۳	CCSM4	--	✓	✓	۰/۹۴۲۴	۱/۲۵
۴	CMCC-CESM	--	--	✓	۳/۴۴۳۱	۳/۷۵
۵	CMCC-CM	--	✓	✓	۰/۷۴۸۴	۰/۷۵
۶	CMCC-CMS	--	--	✓	۱/۸۶۵	۱/۸۷۵
۷	CNRM-CM5	✓	✓	✓	۱/۴۰۱	۱/۴۰۶
۸	CSIRO-Mk3.6.0	✓	✓	✓	۱/۸۶۵	۱/۸۷۵
۹	GISS-E2-H	--	✓	--	۲	۲/۵
۱۰	GISS-E2-R	--	✓	--	۲	۲/۵
۱۱	HadGEM2-AO	✓	✓	✓	۱/۲۵	۱/۸۷۵
۱۲	HadGEM2-ES	✓	✓	✓	۱/۲۵	۱/۸۷۵
۱۳	INM-CM4	--	✓	✓	۱/۵	۲
۱۴	IPSL-CM5A-LR	✓	✓	✓	۱/۸۹۵	۳/۷۵
۱۵	IPSL-CM5A-MR	✓	✓	✓	۱/۲۶۷	۲/۵
۱۶	IPSL-CM5B-LR	--	✓	✓	۱/۸۹۵	۳/۷۵
۱۷	MIROC-ESM	✓	✓	✓	۲/۷۹۰	۲/۸۱۲
۱۸	MIROC-ESM-CHEM	✓	✓	✓	۲/۷۹۰	۲/۸۱۲
۱۹	MPI-ESM-LR	✓	✓	✓	۱/۸۶۵	۱/۸۷۵
۲۰	MPI-ESM-MR	✓	✓	✓	۱/۸۶۵	۱/۸۷۵
۲۱	MRI-CGCM3	✓	✓	✓	۱/۱۲۱	۱/۱۲۵
۲۲	NorESM1-M	✓	✓	✓	۱/۸۹۵	۲/۵

۳-۲. مدل هیدرولوژی

۲۰۱۲ قابل نصب بر روی GIS استفاده شده است. با استفاده از ArcSWAT 2012 حوضه آبریز سد توسط داده‌های DEM با تفکیک مکانی ۳۰ متر مشخص و سپس به ۱۲ زیرحوضه تقسیم گردید (شکل ۱). لایه کاربری اراضی نشان می‌دهد که حوضه آبریز عمدتاً شامل حدود ۴۳/۴۴ درصد مرتع، ۳۰/۶۵ درصد جنگل و ۲۳/۸۷ درصد زمین‌های کشاورزی است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۲۰۱۷). حوضه آبریز به پنج گروه مختلف شیب از صفر تا ۱۰ درصد، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۴۰، ۴۰ تا ۶۰ و بیشتر از ۶۰ درصد تقسیم شده است (شکل ۱). جهت تخمین بهتر بارش

در این مطالعه از مدل SWAT برای شبیه‌سازی جریان رودخانه کر در حوضه آبریز سد درودزن استفاده شده است. مدل SWAT یک مدل بسیار شناخته شده جهت مدل‌سازی جریان رودخانه می‌باشد که در حوضه‌های آبریز کوچک تا بسیار بزرگ نتایج آن قابل قبول بوده است (Shawul et al., 2013; Abbaspour et al., 2015; Rodrigues et al., 2014). پارامترهای ورودی به SWAT شامل لایه توپوگرافی، لایه خاک، لایه کاربری اراضی و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. برای ساخت مدل هیدرولوژیکی و دادن پارامترهای ورودی به SWAT از نرم‌افزار ArcSWAT

در معادلات بالا، R^2 ضریب تعیین، NS شاخص نش ساتکلیف، X_t متغیر آم، \bar{X} مقدار میانگین و n تعداد متغیر X می‌باشد. همچنین m و s به ترتیب بیانگر مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشند.

۱۲ پارامتر که برای واسنجی مدل SWAT استفاده شده‌اند شامل شماره منحنی ۲ (CN2)، هدایت هیدرولیک خاک (SOL-K)، میزان آب در دسترس خاک (SOL-AWC)، چگالی ظاهری خاک (SOL-BD)، ضریب زبری در معادله مانینگ (OV-N)، تأخیر زمانی آب زیرزمینی در پیوستن به جریان پایه رودخانه (GW-DELAY)، حداقل عمق آب مورد نیاز در آبخوان برای ایجاد جریان پایه (GW-QMN)، ضریب آلفای دبی پایه (ALPHA -BF)، ضریب تبخیر آب‌های زیرزمینی (GW-REVAP)، حداقل عمق آب زیرزمینی برای تبخیر (REVAP-MN)، ضریب جبران تبخیر خاک (ESCO) و مقدار نفوذ آب به آبخوان عمیق در مدل SWAT (RCHRG-DP) می‌باشد. شماره منحنی SCS مقدار تولید رواناب در فرمول ارائه شده توسط SCS و ضریب K خاک دبی جریان زیرسطحی خاک به رودخانه (interflow) هنگام وقوع بارش را کنترل می‌کند و این دو پارامتر نقش اصلی در تولید رواناب دارند (Neitsch et al., 2011). سایر پارامترها کنترل کننده سهم آب زیرزمینی در پیوستن به آب رودخانه یا همان جریان پایه می‌باشند. مقدار GWQMN تعیین کننده مقدار حدی سطح آب زیرزمینی است که چنانچه سطح آب زیرزمینی محاسبه شده در مدل از این مقدار بیشتر باشد، آب زیرزمینی می‌تواند به عنوان جریان پایه به رودخانه بپیوندد. ضریب آلفا (ALFA-BF) تعیین می‌کند که چند درصد جریان پایه در روز آم مربوط به روز قبل است و مقدار آن بین صفر تا یک تغییر می‌نماید. پارامتر GW-DELAY تعیین کننده زمان تأخیر آب زیرزمینی (بر حسب روز) پس از نفوذ به آبخوان در پیوستن به جریان پایه رودخانه می‌باشد (Neitsch et al., 2011). پارامترهای مذکور، پارامترهای اصلی در تعیین دبی رودخانه (رواناب و جریان پایه) هستند و در مطالعات بسیار زیادی جهت کالیبره کردن مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Abbaspour et al., 2015; Shawul et al., 2013; Rodrigues et al., 2014). بنابراین در این مطالعه نیز این پارامترها کالیبره شدند. بازه تغییرات ۲۰ درصدی برای کالیبراسیون CN2 و SOL-K در نظر گرفته شده است. برای SOL-AWC بازه تغییرات ۰ تا ۱، برای SOL-BD بازه تغییرات ۰/۹ تا ۲/۵، برای OV-N بازه تغییرات ۰/۰۱ تا ۳۰، برای GW-DELAY بازه تغییرات ۰ تا ۳۶۵ روز، برای GWQMN بازه تغییرات ۰ تا ۵۰۰۰ میلی‌متر، برای ALFA-BF بازه تغییرات ۰ تا ۱ روز، برای REVAP-MN بازه تغییرات ۰/۰۲ تا ۰/۲، برای ESCO بازه تغییرات ۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر و برای RCHRG-DP بازه تغییرات ۰ تا ۱ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که بازه تغییرات پارامترهای مذکور بر اساس مقادیر پیشنهادی و استاندارد ارائه شده توسط عباسپور و همکاران (2004، 2007، 2015) می‌باشد. در مطالعات بسیار زیادی که توسط مدل SWAT انجام شده (Shawul et al., 2013; Rodrigues et al., 2014)، بازه تغییرات مذکور مورد استفاده قرار گرفته و لذا در این مطالعه نیز این مقادیر جهت کالیبره کردن در نظر گرفته شده است. آنالیز حساسیت برای هر پارامتر و در هر ایستگاه هیدرومتری توسط SUFI انجام شده است. الگوریتم حساسیت پارامترها را با استفاده از آزمون آماری t-test و پارامتر P-value ارزیابی می‌کند. پارامتری حساس تر است که دارای مقدار t-test بزرگ‌تر و P-value کوچکتر باشد (Abbaspour et al., 2015). جدول ۲ دبی برداشت سالانه از رودخانه کر و آب زیرزمینی را برای هر زیرحوضه بر اساس آمار سازمان آب منطقه‌ای فارس (۱۳۹۶) نشان می‌دهد. مقادیر دبی برداشت در هر زیرحوضه برای دوره کالیبراسیون در مدل در نظر گرفته شده است.

۴- بحث

۴-۱ تغییر اقلیم در محدوده مورد مطالعه

نقشه پراکنده‌گی متوسط سالیانه بارش در دوره مشاهداتی ۲۰۱۵-۱۹۷۸ بر روی

توسط SWAT در هر زیرحوضه، برای هر زیرحوضه ۱۰ نوار ارتفاعی تعریف شده است. داده‌های پوشش خاک (شکل ۱) نشان می‌دهد که جنس خاک عمدتاً lithosols (۷۷%)، fluvisols-regosols (۱۶%) و fluvisols (۷%) می‌باشد (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۶؛ FAO, 2009). با در نظر گرفتن مقدار حدی (threshold) ۵ درصد برای پوشش خاک و کاربری اراضی و ۱ درصد برای لایه شیب، حوضه آبریز به ۳۰۱ واحد هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم شده است. داده‌های روزانه بارش و دمای پنج ایستگاه هواشناسی در منطقه به مدل SWAT داده شد تا تغییرات مکانی بارش در حوضه آبریز نیز به خوبی در مدل اعمال گردد. تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش هارگریوز و رواناب سطحی با استفاده از روش منحنی SCS (SCS curve number) توسط SWAT مدل شده است. همچنین داده‌های روزانه دبی خروجی سد ملامصدرا طی دوره بهره‌برداری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ نیز به مدل داده شد.

برای کالیبره کردن مدل SWAT از داده‌های دبی اندازه‌گیری شده در چهار ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید (سفید)، دهکده سفید (گاوگدار)، چمریز و درودزن طی دوره ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۵ استفاده شده است. داده‌های دوره ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۵ برای کالیبراسیون و داده‌های دوره ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ برای صحت‌سنجی SWAT مورد استفاده قرار گرفته است. کالیبراسیون، صحت‌سنجی و آنالیز حساسیت مدل SWAT توسط مدل SWAT-CUP و با استفاده از روش بهینه‌سازی SUFI انجام شده است. الگوریتم SUFI تمامی عدم قطعیت‌های یک مدل که ممکن است در پارامترهای ورودی و یا پارامترهای مدل وجود داشته باشد را به کار می‌گیرد و نتایج را در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارائه می‌دهد (Abbaspour et al., 2015). در هر ایستگاه هیدرومتری مؤلفه‌های دبی جریان پایه و رواناب مستقیم با استفاده از مدل PART به صورت روزانه تفکیک شده است. مدل PART به روش دینامیکی (جریان پایه غیر ثابت) مؤلفه‌های جریان را تعیین می‌کند و در مطالعات بسیاری به کار گرفته شده است (Shirmohammadi et al., 1987; Linesly et al., 1982; Rutledge, 2007). مدل PART از داده‌های روزانه دبی برای جدایش جریان پایه از رواناب مستقیم استفاده می‌کند. مدت زمان پس از پیک جریان (N) که در طی آن رواناب مستقیم سهم قابل توجهی به خود اختصاص داده است، با استفاده از معادله تجربی زیر تخمین زده می‌شود (Linsley et al., 1982):

$$N=A^{0.2} \quad (1)$$

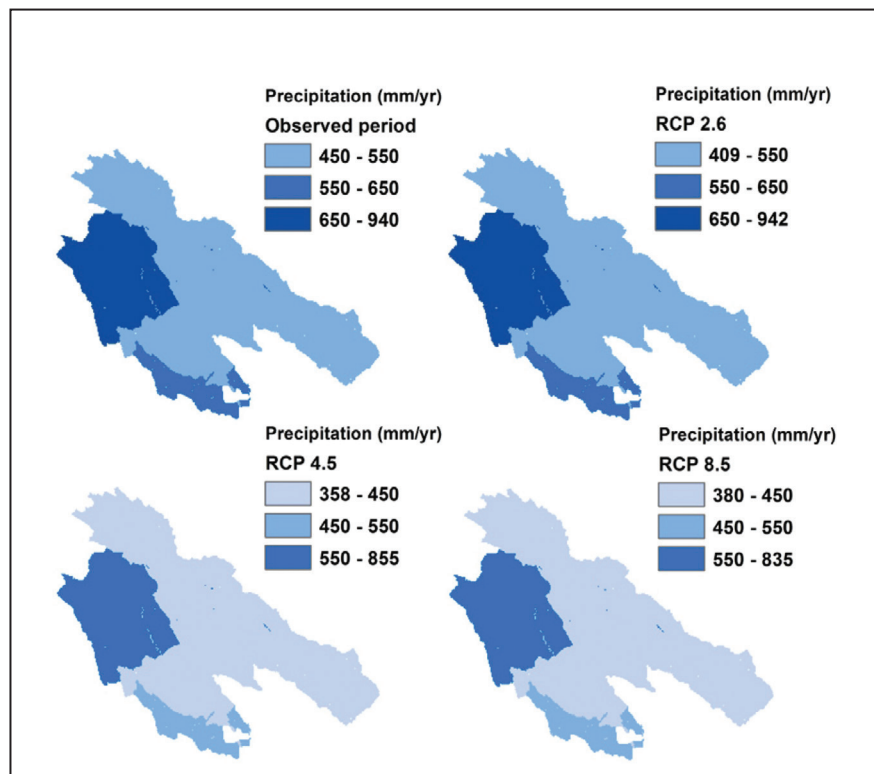
که در آن N تعداد روز بعد از جریان پیک و A مساحت حوضه آبریز بر حسب مایل مربع می‌باشد. در مدل PART فرض می‌شود که جریان پایه برای روزهایی که بر زمان t در معادله ۱ منطبق می‌شود، با جریان در رودخانه معادل است (antecedent recession)، سپس جریان پایه به صورت خطی برای روزهای بین دو فرود متوالی درون‌یابی و رواناب مستقیم روزانه از اختلاف بین جریان پایه و جریان رودخانه محاسبه می‌گردد (Rutledge, 2007). عملکرد مدل SWAT در هر ایستگاه هیدرومتری و برای هر کدام از مؤلفه‌های جریان پایه و رواناب مستقیم ارزیابی شده است. ارزیابی مدل توسط شاخص‌های ضریب تعیین، نش ساتکلیف و فاکتورهای P و R صورت گرفته است. شاخص P بیانگر درصدی از دبی مشاهداتی است که توسط دبی پیش‌بینی شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد احاطه شده و ماکزیمم مقدار آن ۱ است. مقدار R نسبت بازه تغییرات دبی پیش‌بینی شده در اثر عدم قطعیت‌های مختلف به انحراف معیار داده‌های مشاهداتی است. به طور کلی مقدار بیشتر P و کمتر R نشان‌دهنده عملکرد بهتر SWAT در پیش‌بینی جریان می‌باشد (Abbaspour et al., 2015). ضرایب تعیین و نش ساتکلیف با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند (Abbaspour et al., 2015):

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_{itm} - \bar{X}_m)(X_{its} - \bar{X}_s)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_{itm} - \bar{X}_m)^2 \sum_{i=1}^n (X_{its} - \bar{X}_s)^2} \quad (2)$$

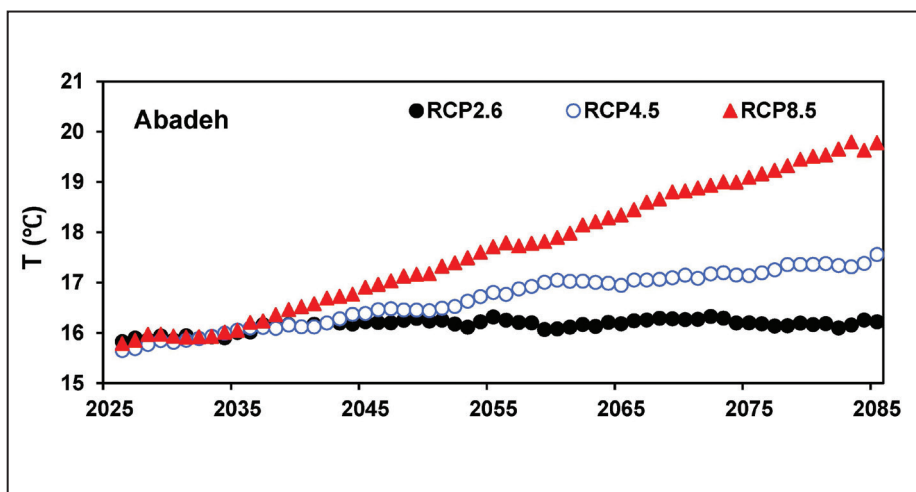
$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{itm} - X_{its})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{itm} - \bar{X}_m)^2} \quad (3)$$

۱۶/۲، ۱۷/۶ و ۱۹/۸ در سال‌های انتهایی سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 خواهد رسید (شکل ۳). متوسط دمای سالیانه در دوره مشاهداتی ۱۹۷۸-۲۰۱۵ حدود ۱۴/۴ درجه سانتی‌گراد است ولی در سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مقدار آن به ۱۶/۱، ۱۶/۷ و ۱۷/۷ خواهد رسید. بنابراین گرمایش زمین موجب خواهد شد تا متوسط دمای سالیانه محدوده مورد مطالعه در طی ۶۰ سال آینده نسبت به شرایط کنونی حدود ۱/۷، ۲/۳ و ۳/۳ درجه سانتی‌گراد تحت سه سناریو افزایش یابد. افزایش دما در آینده موجب افزایش تبخیر و تعرق واقعی خواهد شد. متوسط سالیانه تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز در دوره مشاهداتی حدود ۴۰۵ میلی‌متر است و مقدار آن به ۴۶۰، ۴۶۵ و ۴۷۰ میلی‌متر در سال تحت سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 خواهد رسید که نشان دهنده افزایش تبخیر و تعرق واقعی به مقدار ۵۵، ۶۰ و ۶۵ میلی‌متر در این سه سناریو می‌باشد. بنابراین تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز به مقدار ۱۳/۶، ۱۴/۸ و ۱۶ درصد در سه سناریو افزایش خواهد یافت.

حوضه آبریز سد درودزن در شکل ۲ نشان داده شده است. مقدار متوسط بارش بر روی حوضه از ۶۷۷ تا ۸۵۵ میلی‌متر تغییر می‌کند بطوریکه بارش متوسط کل حوضه ۷۵۱ میلی‌متر است. مقدار بارش در مناطق غرب و جنوب غربی بیشتر از مناطق شرقی و شمالی است. این تغییرات به دلیل نقش اصلی بارش‌ها با منشأ مدیترانه‌ای و دریای سرخ است که به ترتیب از غرب و جنوب غرب منطقه وارد می‌شوند و به ترتیب حدود ۷۴ و ۲۳ درصد از بارش‌ها را شامل می‌شوند (Alijani and Harman, 1985; Beyglou et al., 2009). مطالعه تغییر اقلیم بر اساس میانگین نتایج ریزمقیاس شده ۲۲ مدل در ۵ ایستگاه برای دوره ۲۰۸۵-۲۰۲۶ نشان می‌دهد که متوسط بارش حوضه از ۷۵۱ میلی‌متر در شرایط کنونی به ۶۲۴، ۶۵۳ و ۶۳۰ میلی‌متر تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 کاهش خواهد یافت که بیانگر کاهش ۱۳ تا ۱۷ درصدی است (شکل ۲). متوسط دمای سالیانه ریزمقیاس شده در ایستگاه آباده بر اساس میانگین نتایج ۲۲ مدل نشان می‌دهد که دما از حدود ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد سال‌های ابتدایی سه سناریو به حدود



شکل ۲- نقشه توزیع بارش در دوره مشاهداتی و سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 (پایین).



شکل ۳- دمای متوسط سالیانه ریزمقیاس شده در ایستگاه آباده تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5.

جدول ۲- برداشت سالیانه از هر زیرحوضه (سازمان آب منطقه ای استان فارس، ۱۳۹۶).

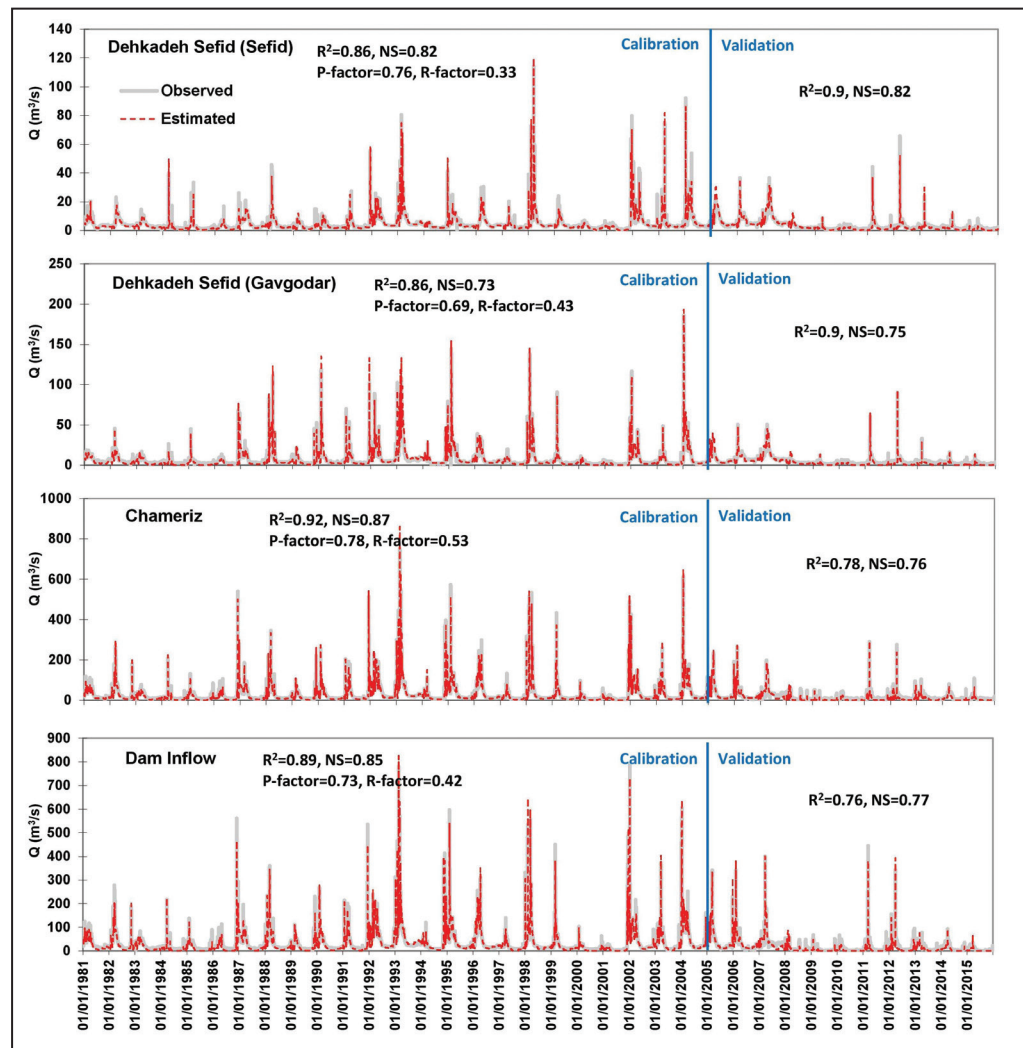
Sub-basin	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
Annual abstraction rate from Kor River (m ³ /s)	۰/۰۸	۰/۰۸۸	۰/۰۱۶	۰/۶۴۹	۰/۰۴۳	۰/۲۸۳	۰/۲۱۴	۰	۲/۵۷۵	۰	۰/۷۵	۰
Sub-basin	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
Annual abstraction rate from Groundwater (m ³ /s)	۰/۱۶۷	۱/۵۱۷	۰	۰	۰	۰/۰۲۵	۰/۰۳۶	۳/۴۳۳	۰/۵	۱/۲۹	۱/۳۱۷	۰/۰۰۴

۲-۴. پیش بینی دبی ورودی به سد در آینده

متوسط سالیانه دبی رودخانه کر در چهار ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید (سفید)، دهکده سفید (گاوگدار)، چمریز و درودزن برای دوره مشاهداتی ۱۹۸۱-۲۰۱۵ به ترتیب حدود ۴/۴۳، ۶/۵، ۲۵/۴ و ۲۸/۶ متر مکعب در ثانیه است. بر اساس نتایج مدل PART، متوسط سالیانه مؤلفه دبی پایه در این چهار ایستگاه برابر ۳، ۴/۶۵، ۱۸/۹ و ۲۰/۴۵ متر مکعب در ثانیه بوده که به ترتیب ۶۷/۷، ۷۱/۵ و ۷۴/۴ و ۷۱/۵ درصد از کل دبی در چهار ایستگاه را شامل می شود. بنابراین قسمت اعظم جریان رودخانه کر (حدود ۷۰ درصد) حاصل زهکشی آب زیرزمینی و آب ورودی چشمه ها می باشد. نتایج آنالیز حساسیت که به طور جداگانه برای هر ایستگاه هیدرومتری توسط الگوریتم SUFI در مدل SWAT-CUP انجام گردید نشان داد که حساسیت مدل نسبت به پارامترها در چهار ایستگاه با یکدیگر متفاوت است. اگر چه در تمامی چهار ایستگاه پارامترهای CN2 و SOL-K حساس ترین پارامترها می باشند ولی سایر

پارامترها در هر ایستگاه حساسیت متفاوتی نشان می دهند.

نتایج کالیبراسیون (دوره ۱۹۸۱-۲۰۰۵) و صحت سنجی (۲۰۰۶-۲۰۱۵) مدل SWAT در پیش بینی دبی روزانه رودخانه کر در چهار ایستگاه هیدرومتری در شکل ۴ ارائه شده است. بازه تغییرات ضریب تعیین و نش ساتکلیف در چهار ایستگاه به ترتیب بین ۰/۹۲-۰/۸۶ و ۰/۸۷-۰/۷۳ می باشد. همچنین مقدار فاکتور p بین ۰/۶۹-۰/۷۸ و فاکتور R نیز در دروه کالیبراسیون بین ۰/۳۳-۰/۵۳ تغییر می یابد. با توجه به ضرایب تبیین و نش ساتکلیف نسبتاً بالا می توان نتیجه گرفت که مدل SWAT به خوبی کالیبره شده و دبی روزانه را به خوبی در هر چهار ایستگاه پیش بینی می کند. متوسط سالیانه دبی مشاهداتی در چهار ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید (سفید)، دهکده سفید (گاوگدار)، چمریز و درودزن برابر ۴/۶۱، ۶/۸۳، ۲۷/۸۳ و ۳۱/۸ متر مکعب در ثانیه و مقادیر پیش بینی شده متناظر برابر با ۴/۵۸، ۶/۹۵، ۲۷/۲۱ و ۳۱ متر مکعب در ثانیه می باشد.



شکل ۴- نتایج کالیبراسیون و صحت سنجی مدل SWAT.

نتایج تحقیقات انجام شده در حوضه‌های گرم و خشک ارائه می‌گردد تا بتوان مقایسه‌ای را انجام داد. در جدول ۳ مؤلفه‌های بیلان آب برای دوره مشاهداتی و همچنین سه سناریو ارائه شده است. در دوره مشاهداتی مقدار بارش ۷۵۱ میلی‌متر در سال بوده که ۴۰۵ میلی‌متر آن از طریق تبخیر و تعرق به جو بازگشته، ۵ میلی‌متر در خاک ذخیره شده، ۲۷۵ میلی‌متر به آب زیرزمینی نفوذ کرده و ۶۵/۸ میلی‌متر نیز رواناب را تشکیل داده است. همچنین مقدار ۱۶۱ میلی‌متر از آب تغذیه شده به آبخوان‌ها بصورت جریان پایه وارد رودخانه می‌شود. تحت شرایط تغییر اقلیم، مقدار بارش از ۷۵۱ میلی‌متر در سال به ۶۲۴، ۶۵۳ و ۶۳۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. از طرف دیگر مقدار تبخیر و تعرق نیز افزایش می‌یابد، به نحوی که از ۴۰۵ میلی‌متر به ۴۶۵، ۴۶۰ و ۴۷۰ میلی‌متر می‌رسد که بیانگر افزایش حدود ۶۵ میلی‌متری است. این امر موجب کاهش ذخیره رطوبت خاک تا ۱۴۵ میلی‌متر، کاهش تغذیه به آب زیرزمینی تا ۱۶۸ میلی‌متر و کاهش رواناب تا ۱۶/۳ میلی‌متر خواهد شد. مقدار جریان پایه رودخانه نیز به مقدار ۶۷ میلی‌متر در سال کاهش خواهد یافت. در نهایت مقدار دبی کل رودخانه از ۲۲۷ میلی‌متر در سال به ۱۵۰، ۱۴۵ و ۱۴۶ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. مطالعات تغییر اقلیم بر روی سایر حوضه‌ها نشان می‌دهد که بعضی مناطق کاهش قابل توجه دبی را تجربه خواهند کرد. به عنوان مثال، بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی حوضه آبریز ششپیر نشان داد که در آینده تا ۴۳٪ دبی رودخانه کاهش خواهد یافت (فرج زاده، ۱۳۹۲). دبی رودخانه تیگریس (Tigris) در اربیل عراق به دلیل تغییر اقلیم (کاهش ۴۰ درصدی بارش و افزایش ۳۰ درصدی تبخیر و تعرق) در آینده بین ۵۶ تا ۵۸ درصد کاهش خواهد یافت (Mohammed and Scholz, 2017). دبی رودخانه فرات (Euphrates) نیز به دلیل تغییر اقلیم در آینده حدود ۳۸ درصد کاهش خواهد یافت (Nohara et al., 2006). با توجه به نتایج بیلان آب حوضه سد درودزن که ارائه شد و همچنین مقایسه آن با نتایج برخی مطالعات در سایر نقاط واضح است که کاهش حدود ۵۰ درصدی دبی ورودی به سد تحت سناریوهای مختلف دور از انتظار نیست.

نتایج مدل برای دوره صحت سنجی (۲۰۱۵-۲۰۰۶) نیز قابل قبول است (شکل ۴). مقادیر ضریب تعیین و نش ساتکلیف به ترتیب بین ۰/۷۸-۰/۹ و ۰/۷۸-۰/۸۲ و ۰/۷۵ برای دبی روزانه در چهار ایستگاه تغییر می‌کند. مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده متوسط سالیانه دبی در چهار ایستگاه نشان می‌دهد که مدل SWAT به خوبی این مقادیر را پیش بینی نموده است. متوسط سالیانه دبی مشاهداتی در چهار ایستگاه هیدرومتری دهکده سفید (سفید)، دهکده سفید (گاوگدار)، چمریز و درودزن برابر ۳/۳۱، ۵، ۱۵/۷ و ۱۶/۸ مترمکعب در ثانیه می‌باشد در حالی که مقادیر پیش بینی شده توسط SWAT برابر ۳، ۴/۹۷، ۱۵/۸۴ و ۱۷ مترمکعب در ثانیه است. همچنین مقایسه گرافیکی بین مقادیر روزانه مشاهداتی و پیش بینی شده نشان می‌دهد که مدل SWAT به خوبی قادر است مقادیر دبی مینیمم (بارش کم) و دبی پیک (بارش زیاد) را پیش بینی کند (شکل ۴). پس از کالیبرسیون و صحت سنجی مدل SWAT، داده‌های بارش و دمای ریزمقیاس شده در ۵ ایستگاه هواشناسی به مدل داده شد تا دبی روزانه رودخانه کر تحت سه سناریوی انتخابی برای دوره ۲۰۸۵-۲۰۲۶ پیش بینی شود. پیش بینی جریان در شرایط تغییر اقلیم حاکی از کاهش چشمگیر دبی رودخانه کر در آینده می‌باشد. متوسط سالیانه دبی رودخانه کر در ایستگاه‌های هیدرومتری دهکده سفید (سفید)، دهکده سفید (گاوگدار)، چمریز و درودزن برابر ۴/۴۳، ۶/۵، ۲۵/۴ و ۲۸/۶ متر مکعب در ثانیه در دوره مشاهداتی ۲۰۱۵-۱۹۸۱ می‌باشد ولی مقدار آن به ترتیب به ۳/۳۴، ۳/۷، ۱۷/۶ و ۱۴/۹ متر مکعب در ثانیه در سناریوی RCP2.6 خواهد رسید که منجر به کاهش ۴۳، ۲۴/۶، ۳۰/۷ و ۴۷/۹ درصدی در این ایستگاه‌ها خواهد شد. متوسط سالیانه دبی در این چهار ایستگاه در سناریوی RCP4.5 حدود ۴۹/۴، ۲۶/۴، ۴۴، ۳۳ و ۵۰ درصد و در سناریوی RCP8.5 حدود ۲۷/۷، ۴۳/۸، ۳۲/۳ و ۴۹/۹ درصد کاهش خواهد یافت. بنابراین دبی ورودی به سد درودزن در آینده در اثر تغییر اقلیم حدود ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت که این کاهش چشمگیر به دلیل کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق در حوضه آبریز سد می‌باشد. جهت بررسی نتایج مدل از دو روش استفاده شده است. در ابتدا پارامترهای بیلان آب محاسبه شده توسط مدل SWAT بررسی می‌شود و سپس چند مثال از

جدول ۳- مؤلفه‌های بیلان آب (میلی‌متر در سال) در حوضه آبریز.

Water balance component	Observation (۲۰۱۵-۱۹۸۱)	RCP2.6 (۲۰۸۵-۲۰۲۶)	RCP4.5 (۲۰۸۵-۲۰۲۶)	RCP8.5 (۲۰۸۵-۲۰۲۶)
Precipitation	۷۵۱	۶۵۳	۶۲۴	۶۳۰
Evapotranspiration	۴۰۵	۴۶۰	۴۶۵	۴۷۰
Initial soil water content	۹۲۹	۸۹۱	۸۱۶	۷۸۷
Final soil water content	۹۳۴	۹۱۷	۸۱۷	۷۸۸/۷
Change in soil water content	۵	۲۶	۱	۱/۷
Groundwater recharge	۲۷۵/۱۷	۱۱۷/۵	۱۰۷/۲۵	۱۰۸/۶۶
Direct runoff	۶۵/۸۳	۴۹/۵	۵۰/۷۵	۴۹/۶۴
Baseflow	۱۶۱/۱۷	۱۰۰/۵	۹۴/۲۵	۹۶/۳۶
Total river flow	۲۲۷	۱۵۰	۱۴۵	۱۴۶

۴-۳. بررسی تغییرات حجم مخزن سد در آینده

است. در این دوره ۱۵ ساله، ماه ژانویه کمترین درصد خروجی (۱/۷۳ درصد) و ماه می بیشترین درصد خروجی (۲۴/۱۶ درصد) را به خود اختصاص داده‌اند. بطور کلی در فصل‌های پاییز و زمستان درصد خروجی نسبت به حجم ذخیره مخزن کمترین مقادیر را دارا می‌باشد و برعکس در فصل‌های بهار و تابستان درصد خروجی از سد نسبت به حجم مخزن افزایش یافته است. این نحوه بهره‌برداری از سد طبیعی بوده زیرا سعی شده است که در فصل‌های پاییز و زمستان آب رودخانه کر تا حد امکان ۲۶۵

مقادیر ماهانه حجم مخزن سد و حجم خروجی از سد برای دوره مشاهداتی ۲۰۱۵-۲۰۰۱ در شکل ۵ ارائه شده است. دبی خروجی از سد در ماه‌های پر باران که حجم مخزن سد افزایش می‌یافته بیشتر بوده و در ماه‌های کم باران دبی خروجی از سد نیز کمتر بوده است. متوسط ماهانه حجم مخزن سد و دبی خروجی در دوره مشاهداتی ۱۵ ساله به ترتیب برابر ۴۹۰ و ۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. در شکل ۶ میانگین ماهانه نسبت دبی خروجی به حجم مخزن سد برای دوره ۱۵ ساله ارائه شده

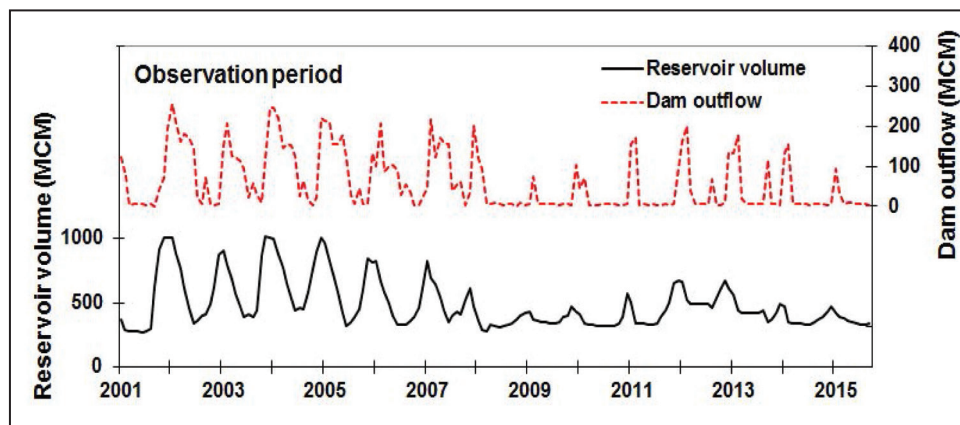
مقادیر ماهانه حجم مخزن و دبی خروجی از سد برای سه سناریو طی دوره ۲۰۸۵-۲۰۲۶ در شکل ۷ ارائه شده است. در سناریوی RCP2.6 مقدار متوسط ماهانه حجم مخزن و دبی خروجی به ترتیب برابر ۳۵۰ و ۴۵/۳ میلیون مترمکعب می باشد. بنابراین متوسط ماهانه حجم مخزن سد تحت این سناریو ۲۸/۶ درصد کاهش خواهد یافت و این در حالی است که متوسط ماهانه دبی خروجی از سد نیز ۲۴/۵ درصد کاهش خواهد یافت. مقادیر متوسط ماهانه حجم مخزن و دبی خروجی در سناریوی RCP4.5 برابر ۲۳۲ و ۳۴ میلیون مترمکعب می باشد که به ترتیب بیانگر کاهش ۵۲/۶ درصدی و ۴۳/۳ درصدی است. در سناریوی RCP8.5 مقدار متوسط ماهانه حجم مخزن و دبی خروجی به ترتیب برابر ۲۴۷ و ۳۵/۹ میلیون مترمکعب است که به ترتیب برابر کاهش ۴۹/۶ درصد و ۴۰ درصد می باشد. بنابراین در اثر تغییر اقلیم در آینده متوسط ماهانه حجم مخزن سد بین ۲۸/۶ تا ۵۲/۶ درصد کاهش خواهد یافت و این در حالی است که دبی خروجی از سد نیز بین ۲۴/۵ تا ۴۳/۳ درصد کاهش خواهد یافت. در جدول ۴ تغییر هر کدام از مؤلفه های بیلان مخزن سد در شرایط تغییر اقلیم بررسی شده است. متوسط ماهانه دبی ورودی به سد در دوره ۲۰۱۵-۲۰۰۱ از ۶۰/۸۶ میلیون مترمکعب به ۴۷/۸۳، ۳۶/۵۵ و ۳۸/۵۳ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت. حجم بارش مستقیم بر روی مخزن سد نیز از ۱/۸۵ میلیون مترمکعب به ۰/۹۸۵ و ۱/۰۶ میلیون مترمکعب در سه سناریو کاهش خواهد یافت. مقدار تبخیر مستقیم آب از مخزن سد نیز از ۳/۳۷ میلیون مترمکعب به ۳/۷۴، ۳/۷۵ و ۳/۹۱ میلیون مترمکعب در سه سناریو افزایش خواهد داشت. با توجه به تغییرات مؤلفه های بیلان مخزن سد، در شرایط تغییر اقلیم، می توان نتیجه گرفت که عامل اصلی کاهش حجم مخزن سد، کاهش دبی ورودی به سد است که خود این عامل در نتیجه کاهش بارش و افزایش میزان تبخیر و تعرق بر روی حوضه آبریز سد می باشد. بنابراین برنامه های مدیریتی که بر روی حوضه آبریز سد متمرکز شوند نسبت به برنامه های مدیریتی متمرکز بر روی مخزن سد بسیار کارآمدتر و نتیجه بخش تر خواهند بود.

پشت سد ذخیره گردد و در ماه های بهار و تابستان که بارش و دبی رودخانه کاهش می یابد از طریق افزایش خروجی سد این کمبود آب جبران شود. البته لازم به ذکر است که اگرچه درصد خروجی نسبت به مخزن سد در ماه های پر باران کمتر بوده ولی مقدار خروجی در این ماه ها بیشتر از ماه های کم بارش است.

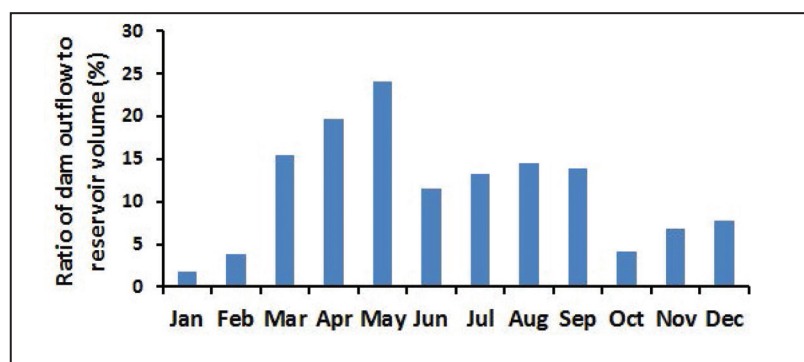
حجم ماهانه مخزن سد در آینده تحت سه سناریوی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 با استفاده از معادله بیلان محاسبه شده است:

$$Q_{in} + R + V_{initial} = Q_{out} + E + V_{final} \quad (4)$$

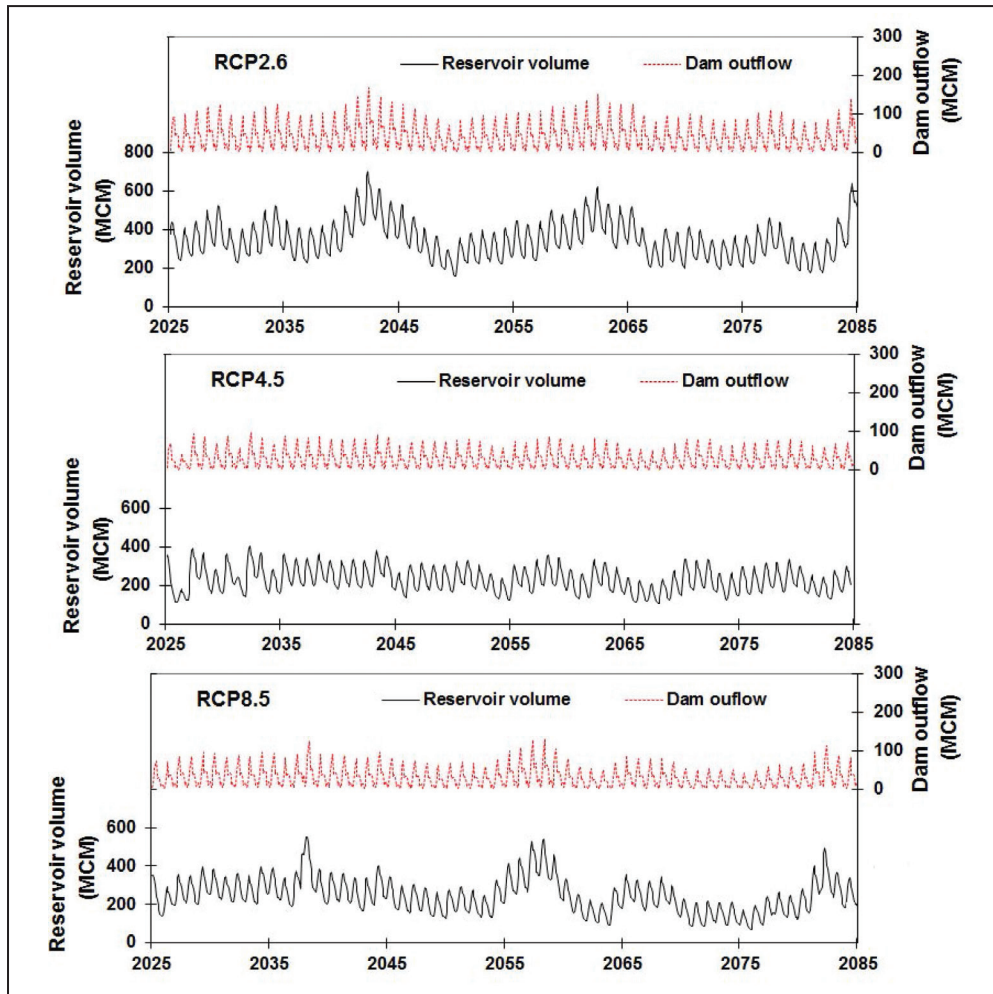
در معادله بالا Q_{in} دبی ورودی ماهانه به سد، Q_{out} دبی خروجی ماهانه از سد، R حجم بارش ماهانه، E حجم تبخیر ماهانه از مخزن سد، $V_{initial}$ حجم مخزن در ابتدای ماه و V_{final} حجم مخزن سد در انتهای ماه می باشد. واحد تمامی پارامترهای معادله بالا میلیون متر مکعب در ماه می باشد. مقدار خروجی از سد برای هر ماه (Q_{out}) بر اساس مقادیر مشاهداتی درصد خروجی نسبت به حجم مخزن در ابتدای هر ماه ($V_{initial}$) در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر برای اینکه تنها اثر تغییر اقلیم بر روی حجم مخزن بررسی شود نحوه بهره برداری از سد مشابه بهره برداری دوره مشاهداتی در نظر گرفته شده است. برای برآورد مقدار حجم بارش بر روی مخزن از بارش ماهانه نزدیکترین ایستگاه هواشناسی استفاده شده است که ایستگاه موروزه می باشد. سپس سطح مخزن در هر ماه نیز بر اساس روابط سطح-حجم تعیین شده و در نهایت حجم بارش ماهانه بر روی مخزن محاسبه شده است (مقدار بارش \times سطح مخزن). تبخیر واقعی ماهانه از سطح مخزن نیز بر اساس رابطه ای تجربی که بین تبخیر واقعی ماهانه و تبخیر و تعرق پتانسیل برای دوره مشاهداتی ۱۵ ساله به دست آمده، محاسبه شده است. معادله به دست آمده $ET (m^3/s) = 0.0011PET (mm/month)1.4672$ دارای ضریب تعیین (R^2) ۰/۸۶ می باشد. سپس از این معادله با توجه به تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه محاسبه شده تحت هر سناریو برای برآورد مقدار تبخیر واقعی ماهانه از مخزن سد استفاده شده است.



شکل ۵- حجم ماهانه مخزن و خروجی از سد در دوره مشاهداتی.



شکل ۶- درصد متوسط ماهانه نسبت خروجی به حجم مخزن.



شکل ۷- حجم ماهانه مخزن و خروجی سد تحت تأثیر تغییر اقلیم.

جدول ۴- مؤلفه‌های بیلان آب در مخزن سد دروزن.

Water balance component							
Observation period (2001-2015)	۶۰/۸۶	۱/۸۵	۴۸۸/۴۶	۶۰	۳/۳۷	۴۸۷/۸	-۰/۶۶
RCP2.6 (2026-2085)	۴۷/۸۳	۱/۴۵	۳۴۹/۷	۴۵/۳	۳/۷۴	۳۴۹/۹۴	+۰/۲۴
RCP4.5 (2026-2085)	۳۶/۵۵	۰/۹۸۵	۲۳۲/۱۶	۳۴	۳/۷۵	۲۳۱/۹۴۵	-۰/۲۱۵
RCP8.5 (2026-2085)	۳۸/۵۳	۱/۰۶	۲۴۶/۹۶	۳۵/۹	۳/۹۱	۲۴۶/۷۴	-۰/۲۲

۵- نتیجه گیری

کاهش بارش (۱۷-۱۳ درصد) و افزایش تبخیر و تفرق (۱۶-۱۳/۶ درصد) بر روی حوضه آبریز سد می باشد. ادامه روند بهره‌برداری از سد مشابه با شرایط بهره‌برداری کنونی، باعث خواهد شد تا متوسط ماهانه حجم مخزن از ۴۹۰ میلیون متر مکعب به ۳۵۰، ۲۳۲ و ۲۴۷ میلیون متر مکعب تحت سناریوهای RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 کاهش یابد و همچنین دبی خروجی از سد نیز از حدود ۶۰ میلیون متر مکعب در ماه به ۴۵/۳، ۳۴ و ۳۵/۹ میلیون متر مکعب در ماه کاهش یابد. کاهش متوسط ماهانه حجم مخزن سد بین ۲۸/۶ تا ۵۳ درصد و همچنین کاهش متوسط ماهانه دبی خروجی از سد بین ۲۴/۵ تا ۴۳/۳ درصد در آینده باعث افزایش کمبود منابع آب در مناطق پایین دست سد نیز خواهد شد و بحران آب را تشدید خواهد کرد. بنابراین به نظر می‌رسد که مدیریت منابع آب در این حوضه جهت توسعه و بهره‌برداری پایدار آن مستلزم بازنگری است.

در این تحقیق اثر تغییر اقلیم بر روی دبی ورودی به سد دروزن تحت سه سناریوی مختلف برآورد شده است. مطالعه تغییر اقلیم نشان می‌دهد که متوسط بارش سالیانه حوضه آبریز از ۷۵۱ میلی‌متر به ۶۲۴، ۶۵۳ و ۶۳۰ میلی‌متر تحت سناریوهای RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 کاهش خواهد یافت که بیانگر کاهش ۱۳ تا ۱۷ درصدی است. همچنین افزایش متوسط دمای سالیانه بین ۱/۷ تا ۳/۳ درجه در آینده باعث افزایش متوسط سالیانه تبخیر و تفرق واقعی بین ۱۳/۶ تا ۱۶ درصد در سه سناریوی مختلف خواهد شد. پیش بینی دبی ورودی به سد توسط مدل SWAT تحت سه سناریو نشان می‌دهد که متوسط سالیانه دبی ورودی به سد از ۲۸/۶ متر مکعب در ثانیه به ۱۴/۹، ۱۴/۲ و ۱۴/۳ متر مکعب در ثانیه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 خواهد رسید که بیانگر کاهش ۴۸ تا ۵۰ درصدی است. این کاهش چشمگیر به دلیل

کتابنگاری

- رامک، ز.، پرهت، ح.، صدقی، ح.، فتاحی، ا. و زند، م.، ۱۳۹۴- بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های حداکثر و حداکثر سیلاب محتمل رودخانه کارون، فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، ۱۲: ۲۱ تا ۳۵.
- رنجیر، ا.، خلیلی، د.، زند پارسا، ش. و کامگار حقیقی، ا. ا.، ۱۳۹۳- پایش خشکسالی منطقه‌ای بر اساس ورودی به سد درودزن در استان فارس، مهندسی و علوم آبیاری، ۳۸: سازمان آب منطقه ای استان فارس، ۱۳۹۶- مرکز آمار و اطلاعات دفتر مطالعات پایه منابع آب، شیراز.
- سهیلی، ف.، ملکی‌نژاد، ح. و اختصاصی، م.، ۱۳۹۶- تحلیل روند خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی در مناطق نیمه خشک ایران (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد درودزن)، مدیریت بیابان، ۹: ۳۱ تا ۴۵.
- شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۶- مرکز آمار و اطلاعات دفتر مطالعات پایه منابع آب، تهران
- صف شکن، ف.، آخوندی، ا. م.، حقیقی، ا. و زارعی، ح.، ۱۳۹۶- بررسی اثر تغییر اقلیم بر ورودی سد درودزن در آینده، مهندسی منابع آب، ۱۰: ۸۳ تا ۹۷.
- فرج‌زاده، م.، ۱۳۹۲- بررسی اثر تغییر اقلیم بر آلودگی رودخانه، مطالعه موردی: رودخانه ششپیر، جغرافیا و طراحی محیطی، ۴۹: ۱۷ تا ۳۶.
- قدمی، م.، سلطانی، س.، گودرزی، م. و نادری، س.، ۱۳۹۷- اثر تغییر اقلیم بر جریان روزانه در حوضه رودخانه سزار، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۴۱: ۸۵ تا ۹۴.
- کاراموز، م.، امامی، ف.، احمدی، ا. و مریدی، ا.، ۱۳۸۸- نحوه بهره برداری از سد تحت شرایط تغییر اقلیم، هشتمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، شیراز.
- مساح یوانی، ع. و مرید، س.، ۱۳۸۴- اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۴: ۱۷ تا ۲۷.

References

- Abbaspour, K. C. Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Klove, B., 2015- A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733- 752. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- Alijani, B. and Harman, J. R., 1985- Synoptic Climatology of Precipitation in Iran. *Annals of the Association of American Geographers*, 75(3): 404- 416. DOI:10.1111/j.1467-8306.1985.tb00075.x.
- Beyglou, M., Khoshakhlagh, F. and Ovji, R., 2009- The seasonal location and frequency of cyclone tracks of wet periods in middle-western Iran. *Natl Geogr Res*, 68: 71- 84. DOI:10.1007/s11069-015-1862-z.
- Dessai S., Lu X. and Hulme M., 2005- Limited sensitivity analysis of regional climate change probabilities for the 21st century. *J. Geophys. Res. Atmos.* 110, n/a–n/a. doi:10.1029/2005JD005919.
- FAO(IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC), 2009- Harmonized World Soil Database (version 1.1), FAO. Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fowler, H. J. and Kilsby, C. G., 2007- Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Clim. Change* 80:337- 367. doi:10.1007/s10584-006-9117-3.
- Hay S. I., Cox J., Rogers D. J., Randolph S. E., Stern D. I., Shanks G. D., Myers M. F. and Snow R. W., 2002- Climate Change and the Resurgence of Malaria in the East African Highlands. *Nature* 415:905- 909.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014- In: Pachauri R. K., and Meyer L. (ed) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Geneva, Switzerland, pp 151.
- Linsley, Jr. R. K., Kohler, M. A. and Paulhus, J. L. H., 1982- *Hydrology for engineers*, McGraw-Hill, New York.
- Mishra, A. K. and Singh, V. P., 2010- A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1): 202- 216. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>.
- Mohammed, R. and Scholz, M., 2017- Adaptation Strategy to Mitigate the Impact of Climate Change on Water Resources in Arid and Semi-Arid Regions: a Case Study. *Water Resources Management*, 31(11): 3557-3573. DOI:10.1007/s11269-017-1685-7.
- Nohara, D., Kitoh, A., Hosaka, M. and Oki, T., 2006- Impact of Climate Change on River Discharge Projected by Multimodel Ensemble. *Journal of Hydrometeorology* (7): 1076- 1089.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R., 2011- *Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009*, Texas Water Resources Institute.
- Reichler, T. and Kim, J., 2008- How well do coupled models simulate today's climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(3): 303- 311.
- Rodrigues, D. B. B., Gupta, H. V. and Mendiondo, E. M., 2014- A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resources Research*, 50(9): 7187- 7205. DOI:10.1002/2013WR014274.
- Rutledge, A. T., 2007- *Program user guide for PART*.
- Semenov, M. A. and Barrow, E. M., 2002- *A stochastic weather generator for use in climate impact studies*. User Man Herts UK.
- Shawul, A. A., Alamirew, T. and Dinka, M. O., 2013- Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2013: 13955-13978. DOI:10.5194/hessd-10-13955-2013.
- Shirmohammadi, A., Sheridan, J. and Knisel, W., 1987- Regional application of an approximate streamflow partitioning method. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(1): 103- 111.
- Wilby, R. L., Hay, L. E., Gutowski, W. J., Arritt, R. W., Takle, E. S., Pan, Z., Leavesley, G. H. and Clark, M. P., 2000- Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. *Geophys. Res. Lett.* 27(1199).
- Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V. and Lettenmaier, D. P., 2004- Hydrologic Implications of Dynamical and Statistical Approaches To Downscaling Climate Model Outputs. *Clim. Change* 62:189- 216.

The impact of climate change on dorudzan dam inflow and reservoir volume, Northern Fars province

M. Naderi^{1*}

¹Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Received: 2018 September 29

Accepted: 2019 February 23

Abstract

The Dorudzan dam inflow is assessed using SWAT under climate change. The daily simulated precipitation and temperature data by 22 general circulation models under RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 are downscaled at five climatic stations using LARS-WG statistical model and transient change factors approach. The precipitation over the watershed will decrease from 751 mm during the observation period to 653, 624 and 630 mm under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5, respectively (13%, 17% and 16.1%). The mean annual evapotranspiration will increase by 13.6%-16% due to increased mean annual temperature by 1.7-3.3°C under three RCPs. The mean annual inflow will decrease from 28.6 m³/s to 14.9, 14.2 and 14.3 m³/s under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5, respectively (47.9%, 50% and 49.9%). The mean monthly reservoir volume will decrease from 490 MCM to 350, 232 and 247 MCM under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5, respectively while the dam outflow will decrease from 60 MCM/month to 45.3, 34 and 35.9 MCM/month, respectively due to the precipitation reduction by 127 mm (17%) and evapotranspiration increase by 65 mm (16%) over the watershed. The reduction of reservoir volume will intensify the downstream water shortage and crisis in the future.

Keywords: Climate change, Dorudzan Dam, Kor River, Water resources.

For Persian Version see pages 259 to 268

*Corresponding author: M. Naderi; E-mail: m.naderi@iasbs.ac.ir