DOI: 10.22034/IAES.2019.98544.1649

اقتصاد کشاورزی/جلد ۱۳/شماره۱/صفحه های ۷۲-۴۷

امنیت آب در حوضه آبریز سد کوثر در شرایط تغییر اقلیم: کاربرد روش سیستم دینامیک

قاسم لیانی و محمد بخشوده[۱]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۵

چکیده

در این بررسی تلاش شده است تا با یک رویکرد سیستمی رفتار سیستم منابع آب در حوضه آبریز سد کوثر شبیه‌سازی شود. به‌طورکلی با توجه به پیچیده بودن سیستم منابع آبی، یکی از بهترین ابزاری که بتوان با آن ارتباط بین همه‌ی اجزای داخل یک سیستم پیچیده را بررسی کرد روش سیستم دینامیک است. سیستم دینامیک یکی از روش‌هایی است که به‌منظور شناسایی رابطه‌های میان سیستم‌های مجزا اما در ارتباط تنگاتنگ باهم و با پویایی در رفتار، استفاده می‌شود. در این بررسی پس از مدل‌سازی و واسنجی مدل طراحی‌شده، رفتار سیستم منابع آب در طول زمان بررسی شد. نتایج نشان داد که در طول دوره شبیه‌سازی میزان منابع آب در دسترس روند کاهشی خواهد داشت. این در حالی است که میزان تقاضای آب که به‌طور مستقیم متأثر از رشد جمعیت است در حال افزایش است. اگرچه درنتیجه افزایش بارندگی با سناریو اول وضعیت جریان ورودی به حوضه بهبودیافته است اما افزایش تبخیر از سطح آزاد آب و افزایش جریان خروجی همچنان سیستم منابع آب را در وضعیت آسیب‌پذیر قرار داده است. به‌طوری‌که در سال‌های آغازین به رغم اینکه شاخص امنیت آب در وضعیت بهتری قرار دارد، اما انتظار می‌رود در سال‌های پایانی این شاخص به پایین‌تر از یک نیز برسد. همچنین نتایج گویای آن است که پایین‌ترین شاخص امنیت آب مربوط به شرایط بدبینانه آب‌وهوایی (سناریو دوم) می‌باشد. لذا سیاست‌های مدیریت تقاضا با کاهش مصرف سرانه آب و یا افزایش بازده (راندمان) آبیاری و کاهش آب مصرفی در هر هکتار از محصول کشاورزی می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت پایدار منابع آب داشته باشد.

طبقه بندی JEL: Q01, Q50, Q21

واژه‌های کلیدی: تفکر سیستمی، مدیریت منابع آب، تقاضا و عرضه آب، ایران.

۱ . به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد(نویسنده مسئول) بخش اقتصاد کشاورزی دانشگاه شیراز
Email: Bakhshoodeh@Gmail.com

مقدمه

منابع آب در دسترس در نقاط مختلف جهان به‌طور گسترده مورد بهره‌برداری بی‌رویه قرارگرفته و رشد جمعیت، تغییرپذیری‌های آب‌وهوا و نیاز به مواد غذایی بیشتر بر این منبع حیاتی فشارهای زیادی وارد کرده است (*Baron et al., 2002; Balali & Viaggi, 2015*). به طوری که امروزه کمبود آب یکی از چالش‌های عمده در بیشتر کشورها به شمار می‌رود (*Wang et al., 2014*) و برآورد می‌شود که در حدود ۲/۸ میلیارد نفر از جمعیت جهان در۴۳ کشور تحت تأثیر کمبود آب هستند، که از این تعداد ۱/۲ میلیارد نفر، حتی به آب آشامیدنی کافی نیز دسترسی ندارند (*UNWWAP, 2015*).

بنا بر پیش‌بینی‌های منتشرشده توسط موسسه منابع آب، نیمی از کشورهای منطقه خاورمیانه تا سال ۲۰۴۰ میلادی، تنش‌های آبی بسیار شدیدی را تجربه خواهند کرد (*FAO, 2016*). به‌طورکلی تغییرپذیری‌های اقلیم با تغییر در الگوی بارش، دما و رویدادهای آب‌وهوایی شدید (سیل و خشک‌سالی) می‌تواند منابع آب، تولید محصولات و سامانه‌های طبیعی را تحت تأثیر قرار دهد (*Sivakumar et al., 2005; Stern, 2007*). ایران هم چالش‌های زیادی را در بخش آب تجربه کرده و محدودیت منابع آب از مهم‌ترین موضوع‌های موردبحث سیاستگذاران است. در دهه‌های اخیر عامل‌های مختلفی همچون تغییرپذیری‌های آب‌وهوا، گرم شدن کره زمین و کاهش میزان بارش و برخی سیاست‌های ساختاری مانند برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی برای توسعه کشاورزی، قیمت پایین آب آبیاری و استفاده ناکارآمد از آب موجب کاهش میزان سرانه آب تجدید پذیر و افزایش بحران آب در کشور شده است (*Balali & Viaggi, 2015*). از سوی دیگر رشد جمعیت کشور در دهه‌های گذشته، در کنار بهبود شاخص‌های اقتصادی و رفاهی کشور سبب افزایش مصرف آب در بخش‌های مختلف شامل کشاورزی، آشامیدنی و صنعت شده است. جمعیت کشور به‌سرعت در حال افزایش بوده به طوری که با این نرخ رشد انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ جمعیت ایران به ۱۰۰ میلیون نفر برسد. با توجه به تداوم افزایش جمعیت در سال‌های آتی، رشد مصرف آب پرهیزناپذیر خواهد بود (*Mohammad Jajani & Yazdanian, 2014*).

مجموعه عامل‌های یادشده منجر به ایجاد شکاف میان عرضه و تقاضای آب‌شده و در ادامه رقابت بیشتر بین مصرف‌کنندگان آب در بخش‌های مختلف را به همراه داشته است. امروز، بخش قابل‌توجهی از کشور با مسئله کاهش منابع آبی دست‌وپنجه نرم می‌کند. به‌عنوان نمونه بررسی آمار و ارقام مربوط به حوضه آبریز زهره نشان می‌دهد میانگین بارش از ۶۰۰ میلی‌متر در سال

۱۳۴۷-۴۸ به ۴۳۸/۴ میلی‌متر در سال ۹۵-۹۴ رسیده است و میزان رواناب از ۴۱۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۴۷-۴۸ به ۱۲۵ میلیون مترمکعب کاهش‌یافته است. ماکزیمم رواناب در کل این دوره معادل ۴۱۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۴۷-۴۸ رخ‌داده است ولی متوسط رواناب ۵ ساله اخیر به ۱۰۰ میلیون مترمکعب کاهش‌یافته است (*Iran Meteorological Organization, 2016*). نه‌تنها تغییرپذیری‌های اقلیم، جمعیت نیز به‌عنوان عامل مهم تأثیرگذار بر تقاضای آب، به‌طور پیوسته در این حوضه در حال افزایش است. افزایش تقاضا ناشی از رشد جمعیت و کاهش عرضه ناشی از خشک‌سالی در آینده‌ای نزدیک موجب نبود تعادل در سیستم منابع آب خواهد شد. این کاهش منابع در تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در سد کوثر به خوبی قابل‌لمس است. کاهش جریان‌های ورودی و افزایش برداشت آب به‌منظور پاسخگویی به تقاضای فزاینده، حجم ذخیره شده آب سد کوثر به عنوان یکی از سدهای مهم در حوضه آبریز زهره را تحت تأثیر قرار داده است. به طوری که در سال‌های اخیر حجم آب ذخیره شده در سد کوثر روند کاهشی داشته است. با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی احداث سد کوثر تأمین آب شرب استان‌های جنوبی کشور است، لذا این روند کاهشی ذخیره آب ناشی از کاهش جریان‌های ورودی و افزایش جریان‌های خروجی نگرانی‌هایی را در بین سیاست‌گذاران ایجاد نموده است. بنابراین سناریو کاهش منابع آب در دسترس چالشی بسیار جدی پیش روی جامعه است و این مسئله خود تأکیدی بر لزوم مدیریت پایدار این منبع حیاتی دارد. بسیار مهم است که کشورها به‌صورت راهبردی، تخصیص منابع آب خود را برنامه‌ریزی کنند و ضمن بررسی سیاست‌های بخش‌های آب و غذا از هماهنگی آن‌ها با یکدیگر و شرایط متأثر از تغییرپذیرهای آب‌وهوا در جهت استفاده بهینه از هر قطره آب اطمینان حاصل کنند.

در طی سال‌های اخیر اگرچه بررسی‌های بسیاری از مدل‌های یکپارچه، با در نظر گرفتن چرخه هیدرولوژی حوضه، برای مدیریت منابع آب استفاده کرده‌اند (*Bharati et al., 2008; Amisigo et al., 2015; Awotwi et al., 2015*)، ولی این بررسی‌ها فرآیندهای بازخوردی و رفتار پویای غیرخطی سیستم منابع آب را در طول زمان در نظر نمی‌گیرند. به‌طورکلی با توجه به پیچیده بودن سیستم منابع آبی، یکی از بهترین ابزاری که بتوان با آن ارتباط بین همه‌ی اجزای درون یک سیستم پیچیده را بررسی کرد روش سیستم دینامیک است. سیستم دینامیک یکی از روش‌هایی است که به‌منظور بررسی و ارزیابی رابطه‌های میان سیستم‌های جدا از هم اما در ارتباط تنگاتنگ باهم و با پویایی در رفتار، استفاده‌شده است (*Forrester, 1961*). شبیه‌سازی پویا به

منظور مدل‌سازی رفتار یک سیستم[۱] و مشاهده عکس‌العمل آن نسبت به تغییرات مختلف در طول زمان سودمند هست. شاید یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم دینامیک در نظر گرفتن ساختاری درون‌زا از سیستم مورد بررسی است تا واکنش عنصرهای مختلف سیستم بر یکدیگر و تاثیر بازخوردی بین آن‌ها را نشان دهد (*Simonovic, 2012*).

در تفکر سیستمی، منابع آب به‌عنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود که از اجزای مختلف تشکیل‌شده است. با شناسایی و در نظر گرفتن حلقه‌های بازخوردی بین اجزای مختلف، سیستم دینامیک می‌تواند یک دید و بینش کلی از سیستم‌های پیچیده فراهم کند و لذا به‌عنوان یک ابزار برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب مناسب می‌باشد (*Hjorh and Bagheri, 2006; Madani & Marino, 2009; Simonovic, 2012*). این روش شبیه‌سازی، مشارکت کاربر را در توسعه مدل فراهم می‌سازد تا در زمان لازم در مسیر حل مسئله دخالت کند. افزون بر این یک روش ساده و دقیق است که در فرآیند تحلیل سیستم به ریاضیات پیچیده نیاز نداشته و به‌عنوان یک روش کارآمد مدل‌سازی در زمینه‌های مختلف کارایی فراوان دارد (*Mahmoudi et al., 2009; Nozari & Mohseni, 2013*). در سال‌های اخیر بررسی‌های چندی از رویکرد سیستم دینامیک به‌منظور شبیه‌سازی رفتار و مدیریت منابع آب در حوضه رودخانه در سطح جهان استفاده نمودند (*Qin et al., 2012; Sušnik et al., 2012; Dawadi & Ahmad, 2013; Liu et al., 2015; Chapman & Darby; 2016; Kotir et al., 2016*).

به منظور توضیح بیشتر، *Gohari et al (2017)* از روش سیستم دینامیک در ارزیابی تغییرپذیر-های اقلیم و راهبردهای همسان‌سازی با این تغییرپذیری‌ها به منظور مدیریت آب در بخش مرکزی ایران استفاده نمودند. مرز مکانی مدل شامل حوزه زاینده‌رود و بازه زمانی نیز بلندمدت (۳۰ سال) انتخاب شد. سیستم منابع آب در سطح حوضه در این مطالعه به سه زیرسیستم هیدرولوژی، اقتصادی-اجتماعی و زیرسیستم کشاورزی تقسیم‌شده است. در زیرسیستم هیدرولوژی منابع آب سطحی، زیرزمینی، اثرهای متقابل بین آن‌ها، بارش و انتقال بین حوزه، و در زیرسیستم اقتصادی-اجتماعی متغیر نرخ رشد اقتصادی به‌عنوان یک متغیر برون‌زا در نظر

---

۱ بطور کلی سیستم مجموعه عنصرهایی است که در ارتباط با یکدیگرند و برای اینکه به یک هدف مشخصی برسند، سازماندهی شدند. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های یک سیستم این است که اجزای آن در تعامل با هم هستند و بر روی یکدیگر تاثیر می‌گذراند. بدین ترتیب به تدریج چیزی به نام رفتار سیستم به وجود می‌آید و پدیدار می‌شود. این رفتار چیزی فراتر از ویژگی‌ها یا تغییرپذیری‌های یک بخش خاص است و از ترکیب تعامل همه اجزای سیستم تشکیل می‌شود.

گرفته شد که بر میزان سرانه مصرف آب در بخش‌های مختلف اثر می‌گذارد. در زیرسیستم کشاورزی ۱۰ محصول زراعی در نظر گرفته شد که سطح زیر کشت هر یک از آن‌ها تابعی از سود خالص در سال قبل است. در نهایت پس از مدل‌سازی اثر تغییرپذیری‌های اقلیم در سناریوهای مختلف بر رفتار سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین *Kotir et al (2016)* در مطالعه خود با هدف مدیریت پایدار منابع آب و توسعه کشاورزی در حوزه رودخانه ولتا، از سه زیرسیستم جمعیت، عرضه و تقاضای آب و زیرسیستم کشاورزی استفاده کردند. درواقع تلاش شده است تا با در نظر گرفتن ارتباط متقابل و اثرگذاری‌های بازخوردی بین این زیرسیستم‌ها، به درک سیاستگذاران در زمینه رفتار سیستم و پویایی بلندمدت آن کمک نمایند و ابزاری جهت ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف مدیریت آب و توسعه کشاورزی در اختیار سیاستگذاران قرار دهند. بازه زمانی بلندمدت و حوزه مورد بررسی نیز در سطح حوزه رودخانه انتخاب شده است. همچنین سناریوهای مورد ارزیابی در این مطالعه شامل توسعه زیرساخت‌های تأمین آب (افزایش حجم مخزن‌ها، دسترسی به منابع آب سطحی بیشتر)، افزایش بارش، افزایش تقاضای آب کشاورزی، توسعه سطح زیر کشت و شرایط حدی خشک‌سالی می‌باشد.

همان‌طور که بیان شد در این بررسی‌ها پس از مدل‌سازی و آزمون مدل، اثرگذاری‌های سیاست‌های مختلف برای مدیریت منابع آب در شرایط تغییرپذیری‌های اقلیم مورد سنجش قرار گرفت. آنچه که از نتایج این بررسی‌ها برمی‌آید، اهمیت مدل‌سازی سیستم دینامیک در برخورد با مسئله مدیریت منابع آب است. چرا که در این مدل‌سازی با یک نگاه جامع و یکپارچه عنصرهای مختلف تأثیرگذار بر سیستم منابع آب در مدل‌سازی لحاظ و بازخورد بین اجزای سیستم نیز در نظر گرفته می‌شود تا بتوان نقاط کم اثر و پر اثر[1] در یک سیستم را شناسایی کرد و از مقاومت سیاستی[2] دوری کرد. همچنین در این بررسی‌ها تأکید بر چرخه بازخوردی بین عرضه و تقاضای آب مشاهده شده است. به طوری که محدودیت عرضه منابع آب می‌تواند منجر به در نظر گرفتن گزینه‌های مدیریتی به منظور کاهش تقاضا شود. افزایش در تقاضای آب همچنین می‌تواند موجب در نظر گرفتن راهبردهای جدید در عرضه آب شود. با چنین دیدگاهی، در این بررسی تلاش شده است با در نظر گرفتن شاخصی همچون شاخص امنیت آب تعادل بین تقاضا و عرضه آب را در مدل‌سازی سیستم آب در سطح حوضه آبریز با روش سیستم دینامیک ارزیابی شد.

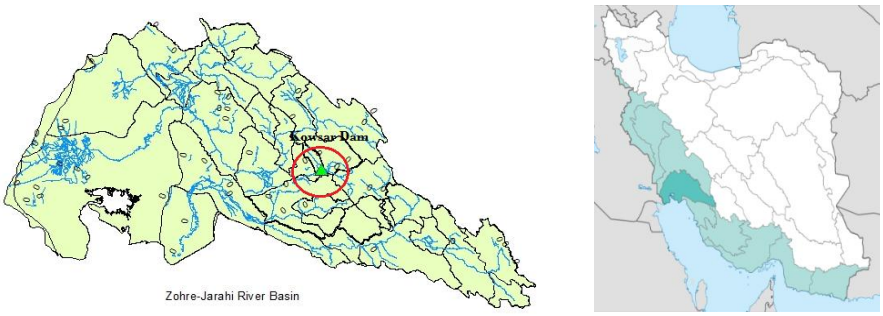
---

[1] High Leverage Point
[2] Policy Resistance

منطقه مورد بررسی:

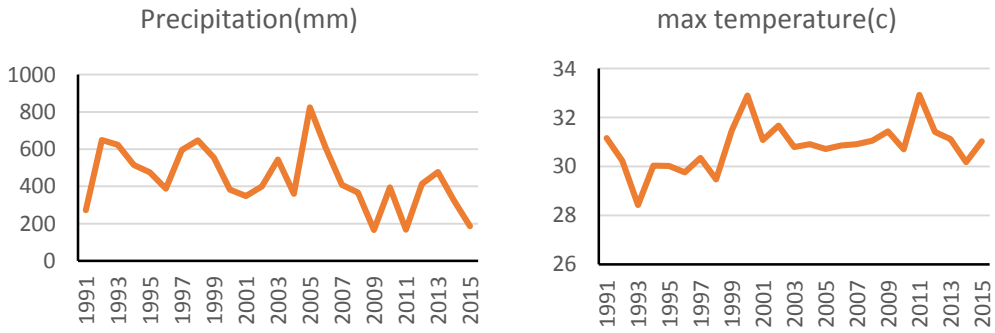
از نظر تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی، حوزه آبریز زهره بخشی از حوضه آبریز خلیج‌فارس بوده و در قسمت جنوبی زاگرس میانی بین مختصات جغرافیایی ۳۱-۴۹ طول شرقی و ۰۰-۳۰ تا ۵۷-۳۰ عرض شمالی واقع شده است. این حوضه از شمال به حوضه‌های آبریز مارون و جراحی، از شرق به حوضه‌های کارون و کر و از جنوب به مسیل‌های دیلم و گناوه محدود می‌شود. این حوضه شامل استان‌های فارس، کهگیلویه و بویراحمد و خوزستان است که استان کهگیلویه و بویراحمد در حدود ۴۰ درصد از گستره این حوضه را به خود اختصاص می‌دهد. گستره حوضه آبریز زهره در حدود ۱۵۴۶۰ کیلومترمربع بوده که حدود ۱۰۶۰۰ کیلومترمربع آن را منطقه‌های کوهستانی و ۴۸۶۰ کیلومترمربع آن را کوهپایه و دشت‌ها تشکیل می‌دهند. سد کوثر یکی از سدهای واقع‌شده در حوضه آبریز زهره است. این سد بر روی رودخانه خیرآباد و در فاصله ۴۲ کیلومتری شمال غرب شهر گچساران واقع‌شده است. این سد به ارتفاع ۱۴۴ متر از نوع بتنی وزنی و حجم مخزن ۵۸۰ میلیون مترمکعب سالیانه ۴۲۶ میلیون مترمکعب آب را برای کاربردهای آب آشامیدنی، کشاورزی و زیست‌محیطی تنظیم می‌کند. یکی از هدف‌های مهم سد تأمین آب شهری و صنعتی به میزان ۱۸۲ میلیون مترمکعب در سال و تأمین آب طرح بزرگ آب‌رسانی به شهرهای حاشیه خلیج‌فارس است. هدف از اجرای طرح آب‌رسانی شهر گچساران تأمین آب این شهر و روستاهای بین راه در افق سال ۲۰۳۰ برای جمعیتی معادل ۱۵۵۰۰۰ نفر است. شبکه آبیاری زهکشی دشت لیشتر نیز از هدف‌های سد مخزنی کوثر است که در استان کهگیلویه و بویراحمد در فاصله ۲۰ کیلومتری غرب شهرستان گچساران واقع است. به‌طورکلی در هر سال از مجموع منابع آب اختصاص یافته به کاربردهای مختلف به طور میانگین در حدود ۳۰ درصد به بخش کشاورزی، ۶۰ درصد به بخش شهری و ۱۰ درصد به بخش صنعتی اختصاص می‌یابد (*Mahab Ghods, 2009*).

بررسی داده‌های اقلیمی دما و بارش در سطح حوضه آبریز موردبررسی نشان می‌دهد که روند بلندمدت بارش در منطقه در حال کاهش و میانگین دما نیز در حال افزایش است.



شکل (۱) حوضه آبریز زهره و موقعیت سد کوثر

بنا بر پیش‌بینی‌های صورت گرفته تا ۱۵ سال آینده میزان بارش ۲۱ درصد کاهش و میزان دما یک درجه افزایش خواهد یافت. با کاهش بارندگی منابع آب ورودی به حوضه کاهش و با افزایش میانگین دما تبخیر و نیاز به آبیاری افزایش خواهد یافت. با توجه به تأثیرپذیری کمیت و کیفیت منابع آب از تغییرپذیری‌های آب‌وهوایی، ضروری است اقدام‌های سریع، جامع‌نگر و دقیق برای رویارویی با کم‌بارشی و افزایش دما تعریف و عملیاتی شود. مدل‌سازی سیستم دینامیک می‌تواند به منظور ارزیابی و شناسایی اثرگذاری‌های سیاست‌های مختلف تقاضامحور و یا عرضه محور در سیستم منابع آب نقش بسزایی داشته باشد.



نمودار (۱) روند تغییرپذیری‌های بارندگی و دما در حوضه آبریز سد کوثر

مبانی نظری و روش تحقیق

الف) سیستم دینامیک

سیستم دینامیک روشی برای بررسی و مدیریت سامانه‌های پیچیده و دارای بازخورد است (*Kotir et al., 2016*). مفهوم بازخورد، نقش اساسی را در رویکرد سیستم دینامیک ایفا می‌کند. این روش مناسب برای نشان دادن الگوهای رفتاری و تحلیل آن‌ها در سیستم‌های پیچیده است و ساخت

مدلی نزدیک به جهان واقعیت را به منظور درک بهتر فرآیندهای مؤثر بر سیستم امکان‌پذیر می‌سازد (*Sterman, 2000*). آنچه که این روش را از دیگر روش‌ها با رویکرد سیستمی متمایز می‌کند توجه به بازخوردها، مفهوم ذخیره-جریان و تأخیر زمانی است (*Ford, 1999*). سیستم دینامیک قابلیت‌های زیادی دارد که شامل: الف) در نظر گرفتن تعامل‌های بین اجزای مختلف درون یک سیستم و درک اثرگذاری‌های متقابل زیرسیستم‌های متفاوت و درعین‌حال مرتبط، ب) در نظر گرفتن ساختاری درون‌زا از سیستم، ج) شناسایی تأخیرها و تأثیرات آن بر رفتار سیستم، د) ساخت مدلی نزدیک به جهان واقعی و شبیه‌سازی ساختار و رفتار سیستم، ه) تحلیل رفتار ایجاد شده در سیستم، انعطاف‌پذیری و قابلیت استفاده از متغیرهای کمی و کیفی، است (*Forrester, 1994; Sterman, 2000; Girard et al., 2015*). سیستم‌های منابع آب شامل تعامل عامل‌های مختلف است و عدم قطعیت در رابطه‌های خطی و غیرخطی میان این عامل‌ها، بررسی و ارزیابی مسئله‌ها و چالش‌های منابع آب را پیچیده می‌کند (*Hassanzadeh et al., 2014*). سیستم دینامیک با نگرش جامع به مسئله‌ها قادر است رابطه‌ها و بازخوردهای فرآیندهای طبیعی را با جنبه‌های اجتماعی-اقتصادی سیستم‌های منابع آب با استفاده از ساختارهای ذخیره و جریان بیان کند (*Sterman, 2000*).

یک فرآیند چهار مرحله‌ای برای مدل‌سازی سیستم دینامیک توسط *Sterman (2000)* و *Ford (1999)* معرفی شد. این مرحله‌ها شامل؛ تعریف مسئله، ترکیب‌بندی، ارزیابی و آزمون مدل، استفاده از مدل در تجزیه‌وتحلیل اثرگذاری‌های سناریوهای مختلف است. بیان مسئله مهم‌ترین مرحله مدل‌سازی سیستم دینامیک است و سه مرحله بعد مرتبط با تعریف مسئله می‌باشند. شناسایی و تعریف روشن هدف‌های مدل بر مبنای مسئله می‌تواند سودمندی و اثربخشی مدل‌سازی سیستم دینامیک را افزایش دهد. این مرحله شامل: الف) تعریف مسئله، ب) شناسایی متغیرهای مهم مرتبط با مسئله به‌عنوان متغیرهای ذخیره، جریان، درون‌زا و برون‌زا، ج) تعیین بازه زمانی و مکانی، می‌باشد (*Sterman, 2000*). فرمول سازی مدل با هدف نشان دادن ساختار مسئله‌ای است که در قسمت اول تعریف‌شده است. نمودار حلقه علی-معلولی و نمودار ذخیره-جریان دو ابزار بنیادین مورداستفاده در ترکیب‌بندی ساختار سیستم است. نمودار حلقه علی-معلولی اگرچه ابزار مناسبی برای نمایش ساختار بازخوردی سیستم و درون‌زایی متغیرهاست اما قادر به نمایش مفهوم‌های ذخیره-جریان نیست (*Ford, 1999*). در یک نمودار ذخیره-جریان، متغیرهای ذخیره که به متغیرهای سطح یا تجمعی نیز شهرت دارند، حافظه یک سیستم دینامیک

هستند و زمانی که آن‌ها در طول زمان تغییر می‌کنند وضعیت یک سیستم در هر نقطه از زمان به‌وسیله آن‌ها تعیین می‌شود. پس‌ازآنکه مدل سیستم دینامیک ایجاد شد و اصول مختلف در مورد آن مورد بازبینی قرار گرفت، باید آن را آزمایش و اعتبارسنجی کرد. در این فرآیند ممکن است، مدل مورد تجدیدنظر قرار گیرد و حتی بار دیگر صورت بندی شود. اعتبارسنجی مدل‌های مربوط به سیستم‌های اجتماعی، مفهومی ابهام‌برانگیز است، که همواره نقد شده است. آزمون ساختاری و آزمون رفتاری ازجمله آزمون‌های اعتبارسنجی مدل سیستم دینامیک است. آزمون ساختاری با مقایسه ساختار مدل با دانش موجود در مورد سیستم واقعی ارائه‌شده در ادبیات موضوع، گزارش‌های سازمان‌ها و بررسی‌های ارزیابی شده انجام می‌شود. آزمون رفتاری نیز به بررسی و مقایسه رفتار یک سیستم با داده‌های تاریخی می‌پردازد (*Sterman, 2000*). پس از اعتبار سنجی مدل در نهایت می‌توان از سیستم طراحی‌شده جهت پیش‌بینی اثرگذاری‌های سیاست‌های مختلف و بررسی رفتار سیستم در طول زمان استفاده کرد.

ب) الگوی سیستم دینامیک منابع آب حوضه آبریز سد کوثر

رشد جمعیت به‌طور مستقیم بر تقاضای آب اثرگذار است. از سوی دیگر تغییرپذیری‌های اقلیم با کاهش بارش منجر به کاهش جریان‌های سطحی ورودی به حوضه شده است. بنابراین مدیریت پایدار منابع آب به گونه‌ای که بتواند افزون بر پاسخگویی به نیاز کنونی، نیاز آینده را نیز در نظر بگیرد دارای اهمیت است. لذا در این مطالعه سیستم منابع آب به دو زیرسیستم جمعیت و زیرسیستم عرضه آب تقسیم‌شده است. تقاضای کل حاصل جمع تقاضای آب برای کاربردهای خانگی، تقاضای کشاورزی، صنعتی و زیست‌محیطی می‌باشد. با توجه به هدف احداث سد کوثر در استان کهگیلویه و بویراحمد در جهت تأمین تقاضای آشامیدنی استان‌های جنوبی، جمعیت در مدل طراحی شده مهم‌ترین عامل تشکیل‌دهنده تقاضا برای منابع آب در این حوضه در نظر گرفته شد. از سوی دیگر بخش قابل توجهی از منابع آب این سد، سالانه به تأمین آب در بخش خانگی اختصاص می‌یابد. در زیرسیستم جمعیت، متغیر جمعیت کل به‌عنوان متغیره ذخیره است که تحت تأثیر نرخ زادوولد، نرخ مرگ‌ومیر و نرخ مهاجرت که نرخ رشد جمعیت را تشکیل می‌دهند، می‌باشد. میزان تقاضای آب برای کاربردهای خانگی (*DWD*) با میزان جمعیت و سرانه آب مصرفی (*PW*) تعریف می‌شود. تقاضای آب کشاورزی به صورت برون‌زا (۹۱/۳۲ میلیون مترمکعب) (*AWD*) و نیاز زیست‌محیطی (*EWD*) در سیستم موردنظر به صورت سری زمانی

تابعی از زمان (تابع لوک آپ[1]) وارد مدل شده است. از سوی دیگر تقاضای آب در صنعت (*IWD*) نیز تابعی از میزان جمعیت و سرانه مصرف آب برای صنعت (*PIW*) قابل محاسبه است. همچنین، سرانه مصرف آب برای صنعت با تقسیم میزان آب مصرفی برای بخش صنعت بر جمعیت در طی سال‌های مختلف به دست می‌آیند (*Balali & Viaggi, 2015*).

$$population = \int (population\ growth\ rate)dt\ +\ population(0)$$

$$Water\ Demand\ in\ Ba\sin_t = DWD_t + AWD_t + IWD_t + EWD_t$$

$$DWD_t = population_t \times PW$$

$$IWD_t = population_t \times PIW$$

زیرسیستم عرضه آب، منابع آب در دسترس در حوضه آبریز سد کوثر را نشان می‌دهد. منابع آب موردنیاز در حوضه آبریز می‌تواند از طریق منابع آب سطحی و یا زیرزمینی تأمین شود. با توجه به اینکه هدف مدل‌سازی شبیه سازی حجم ذخیره آب سد کوثر در سال‌های آینده می‌باشد، لذا تنها جریان‌های ورودی و خروجی به این سد در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شد. در این بررسی زیرسیستم عرضه آب تأکید بر منابع آب سطحی دارد. چراکه اطلاعات کافی از منابع آب زیرزمینی در دسترس نبوده و همچنین منابع آب سطحی اولویت اول تأمین تقاضای آب در منطقه است (*Regional water Company of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad, 2018*). در این زیرسیستم میزان منابع آب ذخیره‌شده در سد (*water storage*) به‌عنوان متغیر ذخیره در نظر گرفته شد. جریان‌های ورودی به متغیر ذخیره شامل رواناب حاصل از بارش (*runoff*) و جریان‌های سطحی ورودی (*surface inflow*) است. جریان‌های خروجی نیز شامل تبخیر (*evaporation*)، سرریز (*spillway*) و دیگر جریان‌های خروجی (*outflow*) برای تأمین تقاضای آب در حوضه می‌باشد. میزان آب تبخیر شده در هرسال تابعی از نرخ تبخیر و گستره دریاچه سد در نظر گرفته شد، به طوری که از حاصل‌ضرب نرخ تبخیر در گستره دریاچه در هرسال میزان تبخیر به دست خواهد آمد. نرخ تبخیر در هرسال نیز تحت تأثیر تغییرپذیری‌های دما قرار می‌گیرد. برای متغیر رواناب ناشی از بارش نیز از چنین رابطه‌ای استفاده شد. به‌بیان‌دیگر میزان جریان ورودی ناشی از بارش تابعی از نرخ بارندگی و گستره دریاچه سد در نظر گرفته شد. به منظور تعریف متغیر گستره دریاچه سد از تابع لوک آپ استفاده شده است که خود تابعی از حجم آب ذخیره شده در سد می‌باشد (*Ford, 1999*). به عبارت دیگر با افزایش حجم آب ذخیره

[1] LOOKUP Function

شده در سد، گستره دریاچه سد افزایش و با کاهش حجم آب ذخیره شده این متغیر کاهش خواهد یافت. رابطه‌های ریاضی در این زیرسیستم در زیر نشان داده شده است:

$$\text{water storage}(t) = \text{water storage}(0) + \int (\text{total water inflow} - \text{total water outflow})dt$$

$$\textit{total water INFLOW}_t = \textit{surface INFLOW}_t + \textit{runoff}_t$$

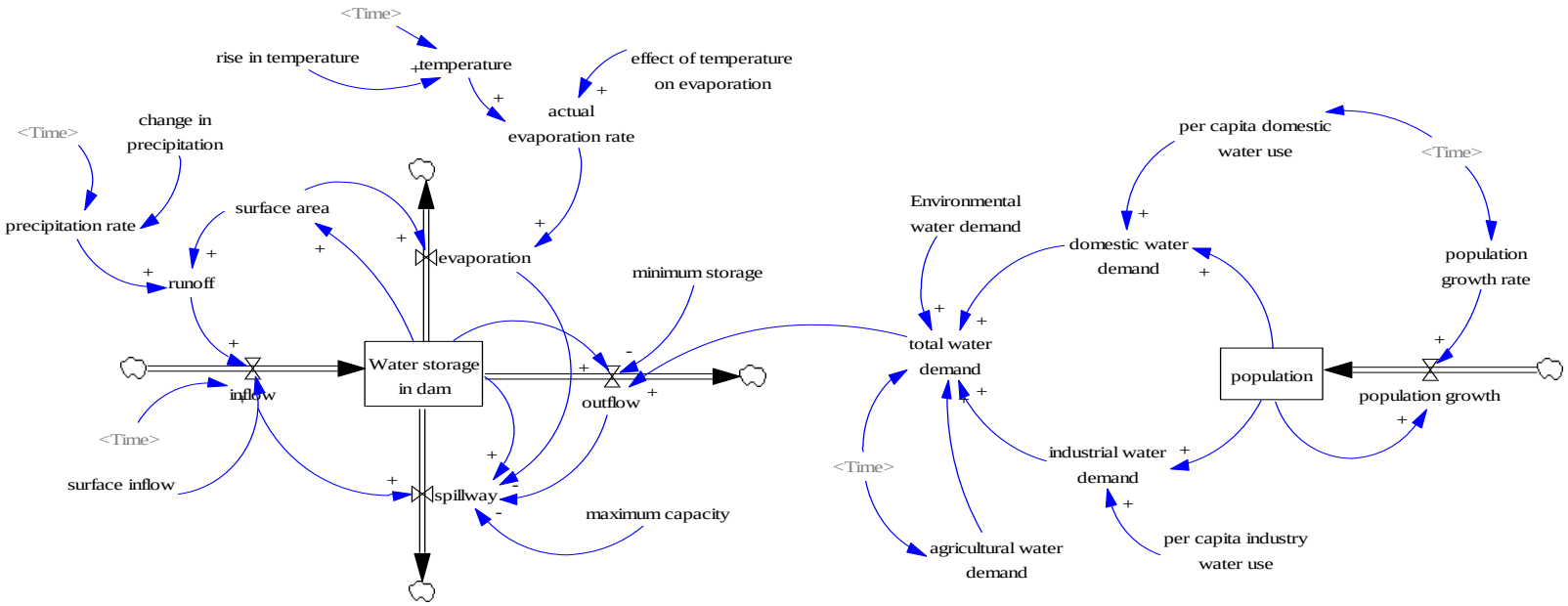
$$\textit{total water outflow}_t = \textit{spillway}_t + \textit{evaporation}_t + \textit{outflow}_t$$

$$\textit{evaporation}_t = \textit{surface area}_t \times \textit{evaporation rate}$$

$$\textit{runoff}_t = \textit{surface area}_t \times \textit{precipitation rate}$$

$$\textit{surface area} = \textit{LOOKUP Function}(\textit{water storage in DAM})$$

$$\textit{evaporation rate} = \textit{temperature} \times \textit{effect of temperature on evaporation rate}$$



نمودار (۲) نمودار ذخیره جریان سیستم منابع آب در حوضه آبریز سد کوثر

ج) شاخص امنیت آب

در سیستم منابع آب طراحی شده متغیر شاخص امنیت آب بنا بر بررسی Zhung et al (2008) و Clifford Holmes et al (2014) به‌صورت زیر تعریف شده است که این شاخص تحت تأثیر میزان عرضه و تقاضای آب قرار دارد:

$$\text{شاخص امنیت آب} = \frac{\text{میزان ذخیره آب}}{\text{میزان تقاضای آب}}$$

این شاخص نشان می‌دهد میزان منابع آب در دسترس تا چه اندازه پاسخگوی تقاضای آب در حوضه است. هدف سیستم منابع آب تأمین آب کافی برای پاسخگویی برای تقاضای تعریف شده در هرسال است. ازاین‌رو، شاخص تعریف شده در بالا باید بزرگ‌تر از یک و یا دست‌کم برابر یک باشد تا حوضه موردبررسی با امنیت آبی روبرو باشد. با این حال مقدار برابر یک این شاخص بیانگر آسیب‌پذیر بودن سیستم منابع آب ناشی از یک تقاضای پیش‌بینی‌نشده و یا افزایش تقاضای ناگهانی است (Clifford Holmes et al., 2014). در این بررسی تلاش شده است تا با فرض ثابت بودن شرایط محیطی درآغاز رفتار سیستم شبیه‌سازی‌شده و روند شاخص امنیت آبی استخراج شود.

در ادامه پس از اعمال سناریوهای تغییر بارش و دما در حوضه آبریز موردبررسی به مقایسه وضعیت سیستم در شرایط مختلف آب‌وهوایی پرداخته شد. سناریوهای موردبررسی در این ارزیابی در جدول زیر گزارش شده است. بنا بر نتایج بررسی‌های مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی (Research Center of Iranian Parliament, 2017) بر مبنای اجرای مدل‌های چرخش عمومی، سه سناریو اقلیمی خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه برای ۱۵ سال آینده تعریف شده است. در زمینه رشد جمعیت نیز سناریوی تعریف شده بنا بر گزارش‌ها Statistical Center of Iran (2017) تنظیم شد. در نهایت برای ساخت مدل و اجرای آن و شبیه‌سازی رفتار سیستم از نرم‌افزار ونسیم[1] استفاده شده است. دوره مورد بررسی در سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱ بوده است که سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۱ برای واسنجی (کالیبراسیون) و راست آزمایی مدل استفاده شد.

[1]Vensim

جدول (۱) تعریف سناریوهای موردبررسی

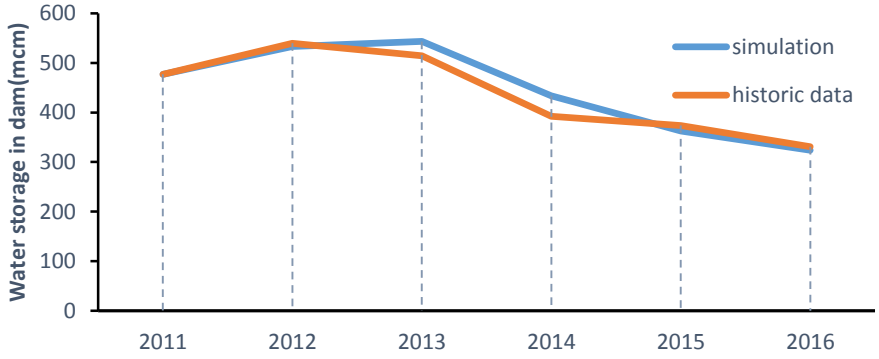
Table 1: Description of different scenarios

سناریو Scenario	شرح Description
سناریو پایه Baseline	نبود تغییر متغیرهای اقلیمی (نرخ بارندگی ۴۴۹ میلی‌متر در سال، میانگین دمای سالانه ۱۴/۹ درجه سلسیوس) و نرخ رشد جمعیت ۱/۵۹ درصد. Current environmental conditions within the basin would remain the same without any change (Precipitation rate is 449 mm/year, Average temperature is 14.9 c, population growth rate is 1.59%).
سناریو اول First Scenario	افزایش ۲۷ درصدی در نرخ بارندگی در دوره شبیه‌سازی، افزایش ۰/۴ درجه سلسیوس در دما (خوش‌بینانه)، تغییر نرخ رشد جمعیت ۲۰۱۶-۲۰۲۰ برابر ۱/۵۹ درصد، ۲۰۲۰ -۲۰۲۷ برابر ۱/۸۷ درصد و در ادامه ۱/۳۸ درصد Precipitation rate increases 27%, Average Temperature increases 0/4^{c} and also Population growth rate over 2016-2020 is 1/59%, 2021-2027 is 1/87% and 2027-2030 is 1/38%.
سناریو دوم Second Scenario	کاهش ۲۱ درصدی در نرخ بارندگی در دوره شبیه‌سازی، افزایش ۱ درجه سلسیوس در دما (بدبینانه)، تغییر نرخ رشد جمعیت ۲۰۱۶-۲۰۲۰ برابر ۱/۵۹ درصد، ۲۰۲۰ -۲۰۲۷ برابر ۱/۸۷ درصد و در ادامه ۱/۳۸ درصد Precipitation rate decreases 21%, Average Temperature increases 1 ^{c} and also Population growth rate over 2016-2020 is 1/59%, 2021-2027 is 1/87% and 2027-2030 is 1/38%.
سناریو سوم Third Scenario	کاهش ۶ درصدی در نرخ بارندگی در دوره شبیه‌سازی، افزایش ۱ درجه سلسیوس در دما (میانه)، تغییر نرخ رشد جمعیت ۲۰۱۶-۲۰۲۰ برابر ۱/۵۹ درصد، ۲۰۲۰ -۲۰۲۷ برابر ۱/۸۷ درصد و در ادامه ۱/۳۸ درصد Precipitation rate decreases 6%, Average Temperature increases 1^{c} and also Population growth rate over 2016-2020 is 1/59%, 2021-2027 is 1/87% and 2027-2030 is 1/38%.

نتایج و بحث:

پس از طراحی مدل و وارد کردن رابطه‌های ریاضی و مقدارهای موردنظر برای متغیرها در دو سیستم جمعیت و عرضه آب، در آغاز توانایی مدل در شبیه‌سازی رفتار سیستم ارزیابی شد. به عبارت دیگر یکی از آزمون‌های ارزیابی مدل طراحی شده مقایسه داده‌های تاریخی با داده‌های شبیه‌سازی‌شده است. بدین منظور رفتار شبیه‌سازی‌شده برای متغیر مقدار آب ذخیره شده در سد با داده‌های تاریخی آن مقایسه و آماره R^2 محاسبه شد. راست آزمایی مدل با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۱ صورت گرفت. مقایسه روند مقدار آب ذخیره شده

در سد طی سال‌های موردبررسی و رفتار شبیه‌سازی‌شده توسط سیستم گویای همخوانی خوب خروجی مدل با داده‌های تاریخی است. مقدار R^2 محاسبه شده معادل ۰/۹۲ می‌باشد. لذا می‌توان از مدل طراحی شده برای بررسی و شبیه‌سازی اثرگذاری‌های سناریوهای مختلف استفاده کرد.



نمودار(۳) مقایسه رفتار شبیه‌سازی‌شده حجم ذخیره آب و داده‌های تاریخی

پس از اعتبار سنجی مدل، رفتار متغیرهای کلیدی مدل بر مبنای سناریوهای تعریف‌شده در جدول (۱)، برای سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۷ شبیه‌سازی شد. نمای نگاره‌ای (گرافیکی) و توصیف الگوی رفتاری متغیرهای منابع آب در دسترس، مقدار تقاضای آب و جریان ورودی آب در سیستم آب طراحی شده، در نمودار ۴ تا ۶ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد با ثابت بودن شرایط محیطی و اجتماعی، تحت سناریو پایه، مقدار آب در دسترس روند کاهشی داشته به طوری که انتظار می‌رود این متغیر از ۳۷۰/۵۶ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۸ به ۲۸۶/۹۱ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۳۰ کاهش یابد. لذا با توجه به روند افزایشی متغیر جمعیت و افزایش برداشت به جهت پاسخگویی به نیاز فزاینده در دوره شبیه‌سازی، توانایی سیستم به منظور پاسخگویی به تقاضای فزاینده آب کاهش می‌یابد. به‌طور جزئی‌تر، مقدار تقاضای آب در حوضه آبریز سد کوثر که به‌طور مستقیم در شرایط تأثیر متغیر جمعیت می‌باشد، در سال ۲۰۱۸ معادل ۲۷۶ میلیون مترمکعب به‌دست‌آمده است که این میزان در سال ۲۰۳۰ به ۳۰۲ میلیون مترمکعب افزایش می‌یابد. متغیر جمعیت از طریق مصرف سرانه آب خانگی و صنعتی بر تقاضا و در نهایت بر خروجی منابع آب سد اثرگذار است. با در نظر گرفتن نرخ بارندگی ۴۴۹ میلی‌متر در سناریو پایه، مجموع جریان‌های سطحی ورودی به‌طور میانگین دارای نرخ تغییر سالانه ۰/۱۹- درصدی

در دوره موردبررسی است. میزان تبخیر از سطح آزاد آب نیز در سال ۲۰۱۸ معادل ۲۸ میلیون مترمکعب بوده که در پایان دوره شبیه‌سازی با کاهش سطح آب دریاچه ناشی از کاهش ذخیره آب به حدود ۲۸ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد.

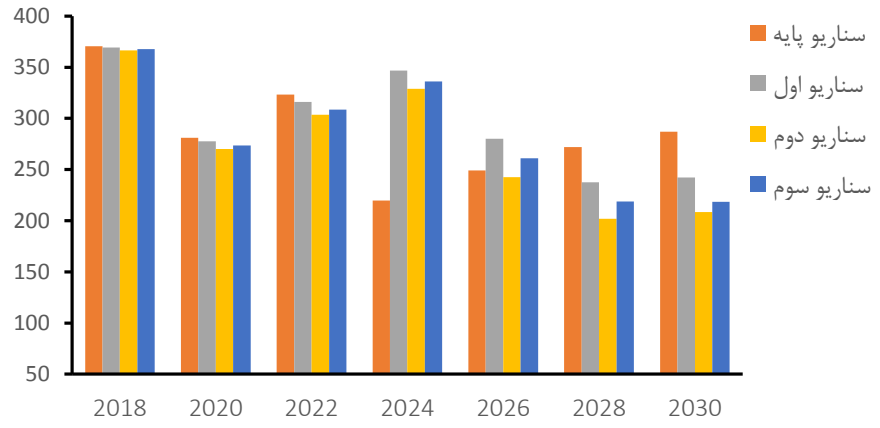
در شرایط سناریوی اول جریان ورودی آب سطحی در نتیجه روند افزایشی بارش، نسبت به سناریو پایه افزایش یافته است. مقدار آب دردسترس در سال ۲۰۱۸ در نتیجه تغییر متغیرهای اقلیمی و نرخ رشد جمعیت در این سناریو، معادل ۳۶۹/۳۲ میلیون مترمکعب است که نسبت به سناریو پایه در حدود ۱/۲۴ میلیون مترمکعب کاهش‌یافته است. این کاهش در انتهای دوره شبیه‌سازی حتی به حدود ۴۳ میلیون مترمکعب نیز می‌رسد. بر مبنای سیستم منابع آب طراحی شده میزان ذخیره آب به رغم تأثیرپذیری از میزان بارش، تحت تأثیر افزایش دما و تبخیر و همچنین تقاضای آب در حوضه نیز می‌باشد. بنابراین اگرچه جریان ورودی به حوضه در نتیجه بهبود شرایط بارندگی افزایش می‌یابد اما رشد جمعیت و افزایش میزان تبخیر در نتیجه افزایش دما در برخی از سال‌های مورد ارزیابی همچنان حجم آب ذخیره شده را نسبت به شرایط پایه در سطح پایین‌تری قرار می‌دهد. اما در این حالت در مقایسه با سناریو دوم (شرایط بدبینانه دما و بارش)، سیستم منابع آب در وضعیت بهتری قرار خواهد گرفت. به طور جزئی‌تر در نتیجه کاهش نرخ بارش و افزایش دما در شرایط سناریو دوم، مقدار آب در دسترس نسبت به شرایط خوش‌بینانه (سناریو اول) کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که حتی در سال‌های پایانی آب در دسترس نسبت به سناریو پایه در حدود ۲۸ درصد و نسبت به سناریو خوش‌بینانه ۱۴ درصد کاهش را تجربه می‌کند.

با کاهش نرخ بارندگی در شرایط اقلیمی بدبینانه، حجم آب سطحی ورودی که تحت تأثیر نرخ بارندگی و گستره دریاچه سد است، نسبت به سناریو اول و پایه در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد. به طور جزئی تر در آغاز دوره شبیه‌سازی جریان ورودی به حوضه معادل ۲۵۸/۲۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. این در حالی است که این متغیر در سناریو پایه و اول در سال ۲۰۱۸ به ترتیب معادل ۲۵۸/۳۵ میلیون مترمکعب و ۲۵۸/۵۰ میلیون مترمکعب به دست آمده است. در پایان دوره شبیه‌سازی نیز انتظار می‌رود جریان ورودی به حوضه در شرایط سناریو دوم معادل ۲۵۶/۹۵ میلیون مترمکعب باشد که نسبت به سناریو پایه حدود ۰/۳۵ درصد پایین‌تر است. همچنین در شرایط این سناریو میزان تبخیر از سطح آزاد با افزایش یک درجه سلسیوس در دما، افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر با توجه به یکسان بودن نرخ رشد جمعیت در شرایط سناریوهای جایگزین (آلترناتیو)، تغییر در مقدار تقاضای آب که خود ناشی از تغییر جمعیت در

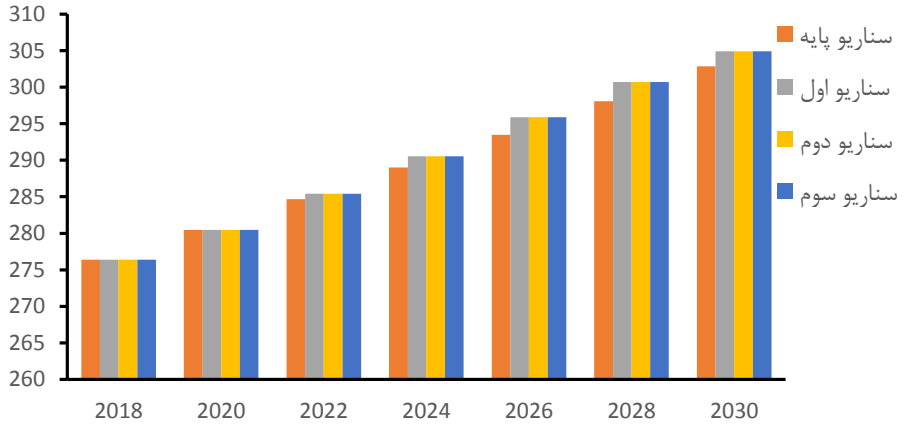
حوضه آبریز است، یکسان است. به بیان دیگر در شرایط سناریوهای اول تا سوم، انتظار می‌رود مقدار تقاضای آب در سال ۲۰۱۸ به ۲۶۷ میلیون مترمکعب و در سال ۲۰۳۰ به حدود ۳۰۵ میلیون مترمکعب برسد. بنابراین جریان خروجی از سد به جهت تأمین تقاضای منطقه با سناریوهای دیگر یکسان و دارای روند افزایشی است. بنا بر نتایج انتظار می‌رود در شرایط بدبینانه آب‌وهوایی در شرایط سناریو دوم توانایی سیستم در پاسخگویی تقاضای فزاینده ناشی از رشد جمعیت کاهش یابد.

همان‌طور که در نمودارهای زیر مشاهده می‌شود مقدار منابع آب در دسترس در طی دوره مورد بررسی در شرایط سناریو سوم نسبت به سناریو دوم بهبودیافته است که این تغییر را می‌توان به بهبود وضعیت جریان ورودی و کاهش تبخیر از سطح آزاد آب نسبت داد. در این حالت جریان ورودی آب سطحی اگرچه نسبت به سناریو پایه و اول در سطح پایین‌تری قرار دارد اما نسبت به سناریو سوم در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. بهبود وضعیت جریان‌های ورودی در مقایسه با سناریو دوم در این حالت موجب بالاتر رفتن حجم ذخیره آب در دوره شبیه‌سازی‌شده است. به طور جزئی‌تر با در نظر گرفتن نرخ بارندگی و دما در سطح میانه، مقدار جریان ورودی آب به حوضه در آغاز دوره شبیه‌سازی معادل ۲۵۸/۳۱ میلیون مترمکعب به‌دست‌آمده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که جریان ورودی به حوضه در طول دوره شبیه‌سازی با نوسان‌هایی همراه است و در سال ۲۰۳۰ به کمترین میزان خود یعنی ۲۵۷/۴۵ میلیون مترمکعب می‌رسد. روند حجم آب در دسترس نیز گویای این حقیقت است که این متغیر در طول دوره رفتار با نوسانی را تجربه خواهد کرد.

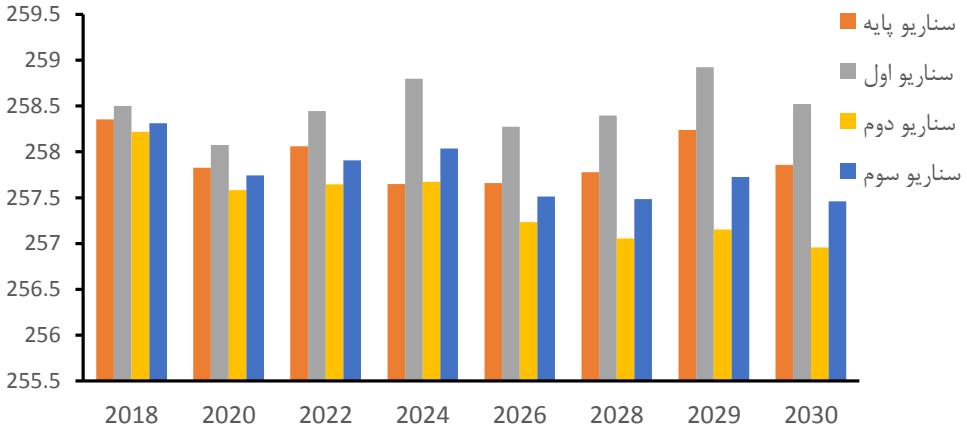
به‌طور خلاصه می‌توان بیان داشت که تأثیر منفی رشد جمعیت و تغییرپذیری‌های آب‌وهوایی بر میزان آب در دسترس به کاهش توانایی سیستم در پاسخگویی تقاضای آب منجر خواهد شد. تغییر توانایی سیستم در تأمین تقاضای پیش رو، با محاسبه شاخص امنیت آب در حوضه مورد بررسی ارزیابی شده است که در ادامه نتایج آن گزارش خواهد شد.



نمودار (۴)روند تغییر پذیریذخیره آب(منابع آب در دسترس)حوضه(یک میلیون متر مکعب)

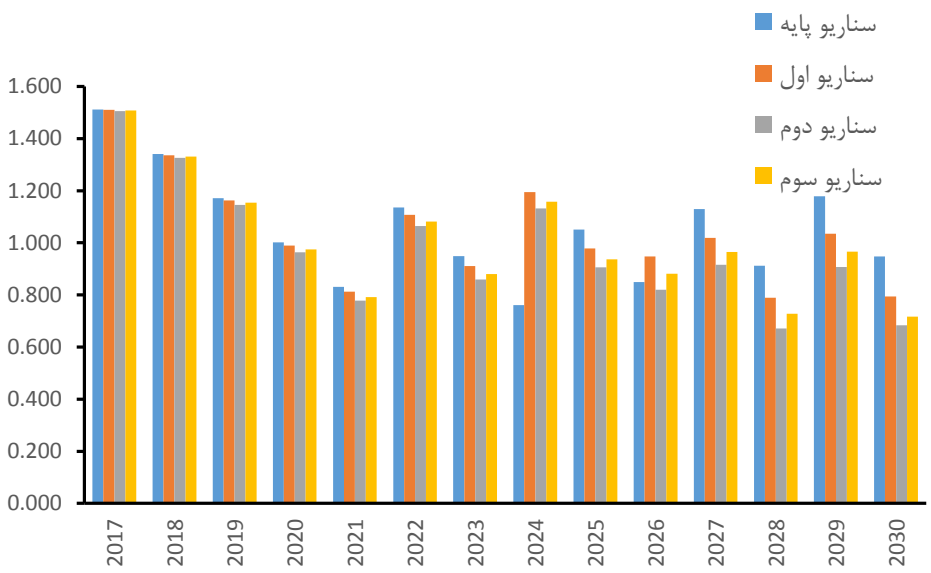


نمودار (۵) روند تغییر پذیری تقاضای آب در حوضه(میلیون متر مکعب)



نمودار (۶) روند تغییر پذیری جریان ورودی به حوضه(میلیون متر مکعب)

نتایج مربوط به محاسبه شاخص امنیت آب در شرایط سناریوهای مختلف در نمودار (۷) ارائه شده است، نتایج نشان می‌دهد که در شرایط سناریو اول و بهبود شرایط بارش به دلیل افزایش جریان ورودی آب و درنتیجه بهبود وضعیت دسترسی به منابع آب نسبت به سناریو دوم و سوم، امنیت آب در سطح بالاتری قرار خواهد گرفت. به‌طورکلی آنچه از نتایج برمی‌آید این است که سیستم منابع آب در حوضه آبریز موردبررسی از نظر شاخص امنیت آب با نوسان‌هایی همراه است. به‌طوری‌که در همه‌ی سناریوهای موردبررسی در آغاز دوره شبیه‌سازی این شاخص روند کاهشی را تجربه خواهد کرد. اما در ادامه، وضعیت سیستم بهبود پیدا کرده و در سال‌های میانی در شرایط پایه و سناریو اول این شاخص بزرگ‌تر از واحد و یا نزدیک به واحد می‌باشد. برابر با انتظار سیستم منابع آب کمترین شاخص امنیت آب را در سناریو دوم و شرایط اقلیمی بدبینانه به همراه رشد جمعیت تجربه می‌کند.



نمودار (۷)شاخص امنیت آب در شرایط سناریو های مختلف

مقدار محاسباتی شاخص امنیت آب به صورت کمی در جدول (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شرایط سناریو پایه این شاخص در آغاز دوره شبیه‌سازی ۱/۳۴۱ می‌باشد و در انتهای دوره به ۰/۹۴۷ کاهش می‌یابد. پس از اعمال سناریو اول در سال ۲۰۱۸ این شاخص با ۰/۳۳ درصد کاهش نسبت به سناریو پایه، معادل ۱/۳۳۶ خواهد بود. در ادامه شاخص امنیت آب کاهش پیدا کرده و در سال ۲۰۲۰ به ۰/۹۸۹ می‌رسد و پس از طی یک روند افزایشی در سال ۲۰۲۴ مقدار ۱/۱۹۴ را تجربه خواهد کرد. در پایان دوره شبیه‌سازی نیز این شاخص در شرایط سناریو اول معادل ۰/۷۹۴ به‌دست‌آمده است. در سناریو دوم در ابتدای دوره شبیه‌سازی شاخص امنیت آب با ۱/۰۷ درصد کاهش نسبت به سناریو پایه معادل ۱/۳۲۶ است. در این شرایط نیز شاخص موردنظر روند با نوسانی را تجربه می‌کند اما از نظر مقداری در بیشتر سال‌های مورد بررسی پایین‌تر از دیگر سناریوهای بررسی شده است. به‌طوری در پایان دوره شبیه‌سازی با ۲۸ درصد کاهش نسبت به سناریو پایه به ۰/۶۸۳ می‌رسد. در نهایت همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود شاخص امنیت آب در شرایط اعمال سناریو سوم در آغاز دوره شبیه‌سازی معادل ۱/۳۳۱ به‌دست‌آمده است و در ادامه با ۴۶ درصد کاهش در سال ۲۰۳۰ مقدار ۰/۷۱۷ تجربه خواهد کرد.

به‌طورکلی با توجه به مقادیر محاسبه شده از شاخص امنیت آب در حوضه مورد بررسی می‌توان نتیجه گرفت که سیستم منابع آب در آینده آسیب‌پذیر خواهد بود. لذا اعمال سیاست‌های مدیریتی تقاضامحور و عرضه محور در جهت مدیریت پایدار منابع آب بسیار اهمیت دارد.

جدول (۲) شاخص امنیت آب در شرایط سناریوهای مختلف

Table 2: Water Security Index under different scenarios

سال	سناریو پایه Baseline	سناریو اول First Scenario	سناریو دوم Second Scenario	سناریو سوم Third Scenario
2018	1.341	1.336	1.326	1.331
2020	1.002	0.989	0.964	0.975
2022	1.136	1.108	1.064	1.082
2024	0.761	1.194	1.132	1.157
2026	0.849	0.947	0.820	0.882
2028	0.912	0.790	0.671	0.728
2030	0.947	0.794	0.683	0.717

منبع: یافته‌های تحقیق References: Findings of the research

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این بررسی تلاش شده است تا با یک رویکرد سیستمی به شبیه‌سازی رفتار سیستم منابع آب در حوضه آبریز سد کوثر پرداخته شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل شبیه‌سازی‌شده می‌تواند رفتار و نتایج قابل قبولی را نسبت به واقعیت ارائه دهد. در همه‌ی سناریوهای موردبررسی میزان ذخیره آب سد دارای روند کاهشی است. این در حالی است که میزان تقاضای آب که به‌طور مستقیم متأثر از رشد جمعیت است، در حال افزایش است. اگرچه در شرایط خوش‌بینانه درنتیجه افزایش نرخ بارندگی وضعیت جریان ورودی به حوضه بهبودیافته است اما افزایش تبخیر از سطح آب و افزایش جریان خروجی همچنان سیستم منابع آب را آسیب‌پذیر کرده است. شاخص امنیت آب نیز گویای همین واقعیت است. به طوری که در برخی از سال‌ها که جریان ورودی به حوضه افزایش می‌یابد این شاخص نیز در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. اما این بهبود وضعیت سیستم تداوم نداشته به‌طوری‌که در سال‌های پایانی مقدار این شاخص کمتر از واحد خواهد بود. لذا اعمال سیاست‌های تقاضامحور و یا عرضه محور برای مدیریت پایدار آب در این حوضه احساس می‌شود. بر مبنای گزارش ارائه شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد، مصرف سرانه آب در شهرهای کهگیلویه و بویراحمد بیش از ۲۲۰ لیتر در شبانه‌روز عنوان شده

است که نسبت به میانگین کشوری در حدود ۲۰ درصد بالاتر است. سرانه مصرف آب آشامیدنی در جهان ۱۲۰ لیتر و در کشور نیز ۱۸۰ تا ۱۹۰ لیتر است. سرانه بالای مصرف آب آشامیدنی در شهرهای استان سبب تشدید تنش آبی و در نتیجه آن کمبود آب و افت فشار آب خواهد شد. لذا تشویق و آموزش مردم برای مدیریت مصرف روزانه خود می‌تواند در جهت پایداری این منبع در این حوضه با اهمیت باشد. همچنین با توجه به بالا بودن نرخ رشد جمعیت در این حوضه، سیاست کنترل جمعیت نیز می‌تواند مدنظر قرار گیرد. از سوی دیگر راندمان آبیاری کشاورزی به‌طور میانگین در ایران پایین است. بررسی روند پذیری‌های راندمان آبیاری در ایران طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد که راندمان کاربرد آبیاری طی سال‌های ۱۳۷۱-۱۳۸۰، ۱۳۹۰-۱۳۸۱ و ۱۳۹۴-۱۳۹۱ به ترتیب ۵۲، ۵۸/۴ و ۵۸/۸ درصد بوده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که راندمان انتقال و توزیع (به معنی هدررفت آب در آبراهه انتقال و توزیع) نیز در دهه‌های مذکور به ترتیب ۶۷، ۶۸/۵ و ۷۴/۲ درصد است. بدین ترتیب راندمان کل در دهه‌های یاد شده به ترتیب ۳۴/۸، ۴۰ و ۴۳/۶ درصد برآورد شده است. نتایج ارزیابی راندمان آبیاری در استان‌های مختلف نیز حاکی از آن است که راندمان کاربرد آبیاری از ۲۲/۷ درصد تا ۸۵/۵ درصد در ایران متغیر است و میانگین آن در حدود ۵۶ درصد می‌باشد. در استان کهگیلویه و بویراحمد نیز راندمان کل آبیاری در حدود ۵۷ درصد گزارش شده است که در مقایسه با بسیاری از استان‌ها از مقدار بیشتری برخوردار است (Abbasi et al., 2015). این در حالی است که راندمان آبیاری در کشورهای مختلف بین ۵۰ تا ۹۰ درصد بسته به نوع فناوری آبیاری متغیر است (Multsch et al., 2017). بنابراین تشویق کشاورزان در زمینه استفاده از تکنولوژی‌های آبیاری برای بهبود راندمان آبیاری و کاهش میزان آب تخصیص‌یافته به هر هکتار می‌تواند نقش بسزایی در افزایش امنیت آب داشته باشد. در پایان یادآوری این نکته نیز ضروری است که سه حالت اقلیمی در نظر گرفته شده در این مطالعه سهم بالایی از حالت‌های رخ داده در چند دهه اخیر را به خود اختصاص داده است. بنابراین شرایط اضطراری کم آبی خیلی شدید و یا پر آبی خیلی شدید در این بررسی در نظر گرفته نشده است. در عین حال برای بررسی‌های بعدی اگر نیاز به ارزیابی با حساسیت‌های بالاتر در منطقه احساس شود ضرورت دارد حالت‌های اقلیمی با احتمال رخداد پایین نیز دنبال شود.

منابع

Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2015). Evaluation of the Efficiency of Irrigation Water in Iran. *Engineering Research of Irrigation and Drainage Structures, 17 (67), 113-120.* do: 10.22092 / aridse.2017.109617 (In Farsi).

Amisigo, B. A., McCluskey, A., & Swanson, R. (2015). Modeling impact of climate change on water resources and agriculture demand in the Volta Basin and other basin systems in Ghana, *Water Resources Management, 7: 6957–6975.*

Awotwi, A., Kumi, M., Jansson, P. E., Yeboah, F., & Nti, I. K. (2015). Predicting hydrological response to climate change in the White Volta catchment, West Africa. *Journal of Earth Science & Climatic Change, 6: 1-7.*

Balali, H., & Viaggi, D. (2015). Applying a System Dynamics Approach for Modeling Groundwater Dynamics to Depletion under Different *Economical and Climate Change Scenarios. Water, 7: 5258-5271.*

Baron, J. S., Poff, N. L., Angermeier, P. L., Dahm, C. N., Gleick, P. H., Hairston, N. G., & Steinman, A. D. (2002). Meeting ecological and societal needs for freshwater. *Ecological Applications, 12(5): 1247-1260.*

Bharati, L., Rodgers, C., Erdenberger, T., Plotnikova, M., Shumilov, S., Vlek, P., & Martin, N. (2008). Integration of economic and hydrologic models: Exploring conjunctive irrigation water use strategies in the Volta Basin. *Agricultural water management, 95: 925-936.*

Chapman, A., & Darby, S. (2016). Evaluating sustainable adaptation strategies for vulnerable mega-deltas using system dynamics modelling: Rice agriculture in the Mekong Delta's An Giang Province, Vietnam. *Science of the Total Environment, 559: 326-338.*

Clifford Holmes, J. K., Slinger, J. H., Musango, J. K., Brent, A. C., & Palmer, C. G. (2014). Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small South African municipality. In 32nd International Conference of the System Dynamics Society, Delft, The Netherlands, 20-24 July 2014; Authors version. System Dynamics Society.

Dawadi, S., & Ahmad, S. (2013). Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. *Journal of environmental management, 114: 261-275.*

FAO. (2016). Climate Change, Water and Food Security. FAO Water Report, Food and Agricultural Organization, Rome: FAO.

Ford, F. A. (1999). Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems. Island Press.

Forrester, J. W. (1961). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society, 48: 1037-1041.*

Girard, C., Rinaudo, J. D., Pulido-Velazquez, M., & Caballero, Y. (2015). An interdisciplinary modelling framework for selecting adaptation measures at the

river basin scale in a global change scenario. *Environmental Modelling & Software, 69: 42–54.*

Gohari, A., Mirchi, A., & Madani, K. (2017). System Dynamics Evaluation of Climate Change Adaptation Strategies for Water Resources Management in Central Iran. *Water Resources Management, 31: 1413-1434.*

Hassanzadeh, E., Elshorbagy, A., Wheater, H., & Gober, P. (2014). Managing water in complex systems: An integrated water resources model for Saskatchewan, Canada. *Environmental Modelling & Software, 58: 12-26.*

Hjorth, P., & Bagheri, A. (2006). Navigating towards sustainable development: a system dynamics approach. *Futures, 38: 74–92.*

Iran Meteorological Organization. (2016).

Kotir, J. H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., & Johnstone, R. (2016). A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment, 573: 444-457.*

Liu, H., Benoit, G., Liu, T., Liu, Y., & Guo, H. (2015). An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale. *Journal of environmental management, 155: 11-23.*

Madani, K., & Mariño, M. A. (2009). System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Water resources management, 23: 2163-2187.*

Mahab Ghods. (2009). Integrated Water Resources Management in Zohreh Basin, Regional Water Organization of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad (In Farsi).

Mahmoudi, M., Bolouri Yazdali., Y., & Hadad, H. (2009). Simulation of Multivariate System Operations in Underwater Conditions Using System Dynamics. Published at the 8th International Civil Engineering Congress in 2009. Shiraz, Iran (In Farsi).

Mohammad Jajani, E. and Yazdanian, N. (2014). Analysis of the state of water crisis in the country and its management requirements. *Trend (Economic Research). 21(65-66): 117-144 (In Farsi).*

Multsch, S., Elshamy, M. E., Batarseh, S., Seid, A. H., Frede, H. G., & Breuer, L. (2017). Improving irrigation efficiency will be insufficient to meet future water demand in the Nile Basin. Journal of Hydrology: Regional Studies, 12: 315-330.

Nozari, H., & Mohseni, V. (2013). Application of the system dynamics method in simulation and optimization of the irrigation and drainage network irrigation network model in Isfahan cascade. Iran Water and Soil Research, 46 (3), 465-474. do: 10.22059 / ijswr.2015.56736 (In Farsi).

Qin, H. P., Su, Q., & Khu, S. T. (2011). An integrated model for water management in a rapidly urbanizing catchment. Environmental Modelling & Software, 26: 1502-1514.

Research Center of Iranian Parliament (2017). Dusty storms in the west and southwest of the country. Causes, origins, focuses and predictions of the future. 1-53 (In Farsi).

Simonovic, S. P. (2012). Managing water resources: methods and tools for a systems approach. Routledge.

Sivakumar, M. V. K., Das, H. P., & Brunini, O. (2005). Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Climatic Change, 70(1-2): 31-72.*

Statistical Center of Iran, 2015. https://www.amar.org.ir.

Sterman, J. D. (2012). Sustaining sustainability: creating a systems science in a fragmented academy and polarized world. In Sustainability science (pp. 21-58). Springer New York.

Sterman, J.D. (2000). Business dynamics, systems thinking and modeling for a complex world (No. HD30. 2 S7835 2000). Boston.

Stern, N. H. (2007). The economics of climate change: the Stern review. Cambridge University press.

Sušnik, J., Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., Savić, D. A., & Kapelan, Z. (2012). Integrated System Dynamics Modelling for water scarcity assessment: Case study of the Kairouan region. Science of the total environment, 440: 290-306.

UNWWAP (United Nations World Water Assessment Program). (2015). Facing the Challenges. Case Studies and Indicators. Paris, UNESCO.

Wang, Y.L., Zhou, R.P., Zhang, M., Zhao, M.N. (2014). Analysis of water resources carrying capacity in Xianyang city under the background of the Xi'an-Xianyang integration. *Applied Mechanics and Materials. 675: 787-793.*

Zhang, X. H., Zhang, H. W., Chen, B., Chen, G. Q., & Zhao, X. H. (2008). Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 13(10): 2328-2336*

DOI: 10.22034/IAES.2019.98544.1649

Agricultural Economics/Volume 13/Issue 1/1398

Water Security in Kowsar Dam Basin under Climate Variability: Application of System Dynamics Approach

Ghasem Layani, Mohammad Bakhshoodeh[1]

Received: 27 Nov.2018 **Accepted:15 June.2019**

Abstract

In this study, we used a systemic approach to study the behavior of the water resources system in the Kowsar Dam basin. Generally, due to the complexity of the water system, one of the best tools for understanding the relationship between all components within a complex system is the system dynamic. System Dynamic is one of the methods that used to facilitate the relationships between separate systems but in connection with each other along with dynamic behavior. After modeling and calibrating the model, the behavior of the water system investigated over time. The results showed that during the simulation period, the water availability would be declining. While water demand, which is directly impacted by population growth, is rising. Under optimistic weather ions (first scenario), the surface water inflow is improving, yet increasing evaporation and outflow of water causes the water supply system to be vulnerable. As the water security index is in a better situation in the early years, it is expected to reach even lower than one at the end of simulation period. The results also indicated that the lowest water security index is related to pessimistic climatic conditions (second scenario). Therefore, demand management policies can play a significant role in the sustainable management of water resources by reducing water use per capita or increasing irrigation efficiency and reducing water consumption per hectare of agricultural production.

JEL Classification: Q01, Q50, Q21
Keyword: System Thinking, Water Management, Supply and Demand of Water, Iran.

[1]Respectively:Ph.D. Student and Professor of Agricultural Economics at Shiraz University
Email: Bakhshoodeh@gmail.com