



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و هشتم، شماره اول، ۱۴۰۰

۲۳-۴۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2021.18451.3402

مقاله کامل علمی - پژوهشی

## شبیه‌سازی و پویایی سیستم منابع آب حوزه آبخیز هیرمند تحت سناریوهای مدیریتی

ندا علی‌احمدی<sup>۱</sup>، ابراهیم مرادی<sup>۲\*</sup>، سید مهدی حسینی<sup>۲</sup> و علی سردار شهرکی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، آستادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۴

### چکیده

سابقه و هدف: یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح برای بشر در قرن حاضر دسترسی به منابع آب است. رشد روز افزون جمعیت و گسترش صنعت، توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک تأمین آب مطمئن را به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل کرده است. کاهش منابع آب و بحرانی شدن وضعیت آن در بخش‌های شرب، کشاورزی، صنعت و زیست‌محیطی را با مشکل بزرگی روبه‌رو ساخته است. یک اصل اساسی و ضروری، رسیدن به تعادل نسبی در زمینه عرضه و تقاضا آب است که با ایجاد نظام جامع مدیریت آب پدیدار می‌گردد.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در حوزه آبخیز هیرمند در منطقه سیستان و با تأکید بر مسأله جریان رودخانه هیرمند و حجم آب چاه‌نیمه‌ها در طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۷ صورت گرفته است. به منظور کنترل تراز چاه‌نیمه‌ها، گام‌های مدل‌سازی توسعه داده شد و اساس مسأله در جریان شکل‌گیری نمودارهای جریان-ذخیره مورد بررسی قرار گرفت. با به‌کارگیری از نرم‌افزار Vensim اثر هرکدام از متغیرها، بر روی مسأله شبیه‌سازی شده و کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل به روش‌های مختلفی مانند آزمون‌های آماری مورد برازش قرار گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج آزمون‌ها بیانگر آن است که مدل با واقعیت مطابقت داشته است و رفتار مدل مطابق با رفتار سیستم در واقعیت می‌باشد. به گونه‌ای که طبق آزمون‌های آماری صورت گرفته بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای متغیر ذخایر چاه نیمه ضریب تعیین برابر ۰/۸۴، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برابر ۰/۲۵ و معیار نش-ساتکلیف برابر ۰/۷۷ در سال ۱۳۹۷ می‌باشد. براساس یافته‌های به‌دست آمده، مقادیر تقاضا برای نیازهای مختلف کشاورزی، شرب و محیط زیست در سال‌های آینده افزایش می‌یابد. میزان کل تقاضا در سال ۱۴۱۰ از ۱۳۵۰/۰۱ به ۱۵۱۵/۹۳ میلیون مترمکعب می‌رسد که تأمین نیازها با وجود کاهش منابع سیستم غیرممکن خواهد شد. بیش‌ترین افزایش در میزان تقاضاها در بخش کشاورزی و شرب خواهد بود. نتایج حاصل از سناریوها نشان می‌دهد که سیاست‌های راندمان آبیاری ۷۰ درصد در بخش کشاورزی و کاهش تلفات آب (کاهش تبخیر به میزان ۵۰٪) مبتنی بر سناریوهای پیشنهادی توسط مدل اجرا گردید.

\* مسئول مکاتبه: [ebmoradi31@gmail.com](mailto:ebmoradi31@gmail.com)

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان می‌دهد که سیاست‌های راندمان آبیاری ۷۰ درصد در بخش کشاورزی و کاهش تلفات آب (کاهش تبخیر به میزان ۵۰٪) مبتنی بر سناریوهای پیشنهادی توسط مدل اجرا گردید. با بررسی نتایج این سناریوها مشاهده می‌گردد که هر یک از این راهکارها، باعث کاهش کمبود آب در سال‌های آتی می‌گردد ولی بهترین نتیجه در سناریوی اول (راندمان آبیاری ۷۰ درصد در بخش کشاورزی) حاصل شده است. در حالت کلی یافته‌ها نشان می‌دهد که ادامه روند مصرف فعلی و به تبع آن ادامه برداشت از منابع آب با همین روند، اثرات جبران ناپذیری در پی خواهد داشت. در این وضعیت مدل‌سازی مصرف بهینه در بخش‌های مختلف، رعایت شرایط حدی و فرهنگ‌سازی مبتنی بر عدم اسراف جزو مسائل کلیدی در مدیریت بحران می‌باشد و یکی از اساسی‌ترین پایه‌های مدیریت مصرف می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پویایی سیستم، حوزه آبخیز هیرمند، مدل‌سازی و شبیه‌سازی، مدیریت منابع آب، Vensim

### مقدمه

در دهه‌های اخیر در مناطق خشک و نیمه خشک آب از مهم‌ترین منابع راهبردی جوامع بشری و عنصری برای توسعه پایدار در جهان شناخته شده است (۲۰). مهم‌ترین تهدید برای بشر و عامل محدودیت برای توسعه پایدار، وجود بحران آب ناشی از افزایش رشد جمعیت و توسعه اقتصادی جامعه می‌باشد (۱۹ و ۲۱). قسمتی از تأمین نیازهای بخش‌های مختلف از طریق مهار آب‌های سطحی به‌وسیله مخازن انجام می‌گردد. وجود محدودیت منابع آب تحت کنترل و افزایش مداوم تقاضاها، نیاز به برنامه‌ریزی مناسب جهت مدیریت و بهره‌برداری بهتر منابع آب دارد. به گونه‌ای که از منابع موجود به بهترین حالت استخراج گردد، سبب رفع نیازهای نسل فعلی و آینده می‌گردد. هدف‌های گوناگون در تحلیل سیستم‌های مخازن موجب ایجاد مدل‌های مختلف از این سیستم‌ها می‌شود. هدف اصلی این مدل‌ها قانونمندی و بررسی و ارزیابی طرح‌های گوناگون به جهت پاسخ‌گویی به مسائل و تقاضاهای آب است (۱۵). مدل‌های رایج مهندسی سیستم‌ها که برای مخزن‌ها استفاده شده‌اند، مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب بهینه‌سازی و شبیه‌سازی است. در مدل‌های بهینه‌سازی بر حداقل و حداکثر کردن تابع

هدف که دارای تعدادی متغیرهای تصمیم‌گیری است با باتوجه به قیودی انجام می‌گردد. مدل‌های شبیه‌سازی با هدف بهبود طرح‌ها و سیاست‌های بهره‌برداری می‌باشد. این چنین مدل‌ها با توجه به متغیرها و پارامترهایی که فرد تعیین می‌کند، به پیش‌بینی رفتار سیستم می‌پردازند. اعتبار مدل‌های شبیه‌سازی در قدرت و توانایی آن‌ها جهت حل مدل‌های تحلیل سیستم‌های منابع آب می‌باشد که دارای روابط و قیود غیرخطی هستند، در صورتی که متدهای بهینه‌سازی خیلی کم قدرت و توانایی رسیدگی به آن مسائل را دارند (۹، ۱۳). تحلیل سیستم‌ها در زمینه مدیریت منابع آب دارای جایگاه مهمی است و شبیه‌سازی یک ابزار لازم و ضروری تصمیم‌گیری در فرایند مدیریت مخازن می‌باشد (۸).

سیستم‌های منابع آب به تعامل میان عوامل گوناگون گفته می‌شود و عدم قطعیت در روابط خطی و غیرخطی بین عوامل، ارزیابی و بررسی معضلات و مسائل در ارتباط با منابع آب را سخت‌تر و پیچیده‌تر می‌نماید (۴). با توجه به پیچیدگی‌های مربوط به مسائل سیستم‌های منابع آب و سایر سیستم‌ها در تعامل و وابسته به آن، نیاز به یک نگرش جامع و کامل و آینده‌نگر دارد، به گونه‌ای که همه جوانب تأثیرگذار و بازخوردهای اجزا بر همدیگر را به خوبی

شبیه‌سازی می‌نماید و در نظارت شرایط حاضر و آتی در استخراج راهبردی و گزینه‌های مدیریتی اثرگذار می‌باشد.

از ابزارهای سودمند در نگرش یکپارچه در شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌ها، روشی براساس نگرش سیستم‌های پویا است که اولین بار توسط فارستر در دهه ۶۰ مطرح شد. برعکس مدل‌های ریاضی، روش سیستم‌های پویا قابل به‌کارگیری در پژوهش‌های ماکروسکوپی پویا و درازمدت را دارد و ارتباط میان مسائل اقتصادی-اجتماعی، منابع آب، زیست‌محیطی، کنترل سیل و کاهش آسیب‌های حوادث طبیعی را به خوبی تعریف می‌کند (۴). بدین‌منظور، اکثر پژوهشگران جهت ارزیابی و بررسی سیستم‌های پیچیده‌ای چون منابع آب، از رهیافت یکپارچه سیستم‌های پویا بهره می‌جویند.

کاربردهای رویکرد سیستم داینامیک در زمینه‌های گوناگون روبه گسترش می‌باشد. در طول سال‌های اخیر، پژوهشگرانی در زمینه‌های گوناگون در ارتباط با آب، این رویکرد را به‌کار برده‌اند: اعلمی و همکاران (۲۰۱۵)، به مدل‌سازی پویای سیستم سد و آب‌های زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه آب برای سد گلک پرداخته‌اند. نتایج بیانگر آنست که با احداث سد تغذیه‌ای گلک و با تأمین صددرصد نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی از طریق منابع آب زیرزمینی، می‌توان بیلان منابع آب زیرزمینی منطقه را به ۰/۵۷ رساند که این در نتیجه تزریق سالانه ۲ میلیون مترمکعب از طریق پخش سیلاب می‌باشد (۱). سان و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ای به بهره‌برداری پایدار از منابع آب در چین با استفاده از مدل پویایی سیستم پرداخته‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که یک برنامه توسعه پایدار می‌تواند نه تنها سبب رشد اقتصادی پایدار و حمایت از منابع زمین‌های زراعی شود، بلکه موجب

حداکثرسازی نرخ تصفیه فاضلاب و بهبود بهره‌وری مجدد از آب شود. علاوه بر این، راه اساسی برای ایجاد ارتباط بین عرضه و تقاضای منابع آب بهبود عرضه آب به جای کنترل تقاضا است (۱۹). عزیزی و همکاران (۲۰۱۷)، به ارزیابی عملکرد بهره‌برداری از سدهای حوزه آبخیز ارومیه با رویکرد پویایی سیستم‌ها پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که طرح‌های سازه‌ای در سطح حوزه ۴۲ درصد از جریان ورودی به دریاچه را کاهش داده‌اند که از این میزان حدود ۲۶٪ مربوط به بهره‌داری از هفت سد اصلی است و ۱۶٪ در ارتباط با توسعه کشاورزی و افزایش بهره‌برداری از نیاز آبی در حوزه بوده است (۳). مهرآذر و همکاران (۲۰۱۷)، در مطالعه‌ای به مدل‌سازی یکپارچه سیستم‌های منابع آب، کشاورزی و اقتصادی-اجتماعی دشت هشتگرد با رویکرد دینامیکی سیستم‌ها پرداخته‌اند. نتایج صحت‌سنجی مدل برای متغیرهای جمعیت، نیاز آب شرب، نیاز آب صنعت و ارزش افزوده نشان داد مدل به‌منظور بازسازی رفتار پارامترهای مختلف درون سیستم به خوبی واسنجی شده و نشان‌دهنده توانایی مدل در شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب دشت هشتگرد تحت سیاست‌های مختلف در دوره‌های آتی است. بنابراین این مدل را می‌توان ابزار پشتیبان تصمیم در ارزیابی اثرات تصمیم‌ها و اقدام‌های مختلف بر بخش‌های مختلف دشت هشتگرد در مدیریت بحران آب موجود در منطقه به‌کار برد (۱۰). صباغی و همکاران (۲۰۱۸)، به شبیه‌سازی و ارزیابی شاخص تکاپوی آب سد مخزنی شهید یعقوبی با استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در سال‌های ۹۱-۱۳۷۸ پرداخته‌اند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پژوهش‌های میدانی و مشورت با متخصصین منابع آب منطقه، به ارزیابی عملکرد سد و شاخص تکاپوی آب (W.D.P) که

بحرانی آب منطقه لازم دانسته شد که منابع آب منطقه در تمامی بخش‌های جمعیت، کشاورزی، اقتصادی-اجتماعی و زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین با توجه به این‌که تاکنون هیچ پژوهشی با استفاده از روش پویایی سیستم‌ها و با در نظر گرفتن مخازن چاه‌نیمه مورد بهره‌برداری و نیز در نظر گرفتن روابط و بازخوردهای بین مصارف گوناگون انجام نگرفته است و با توجه به اهمیت مطالعه حوزه هیرمند بعنوان یکی از عوامل مهم در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در منطقه، در این مطالعه با بهره‌گیری از رویکرد پویایی سیستم‌ها اثر سناریوهای مختلف بر حجم آب مخازن و کمبود در بخش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

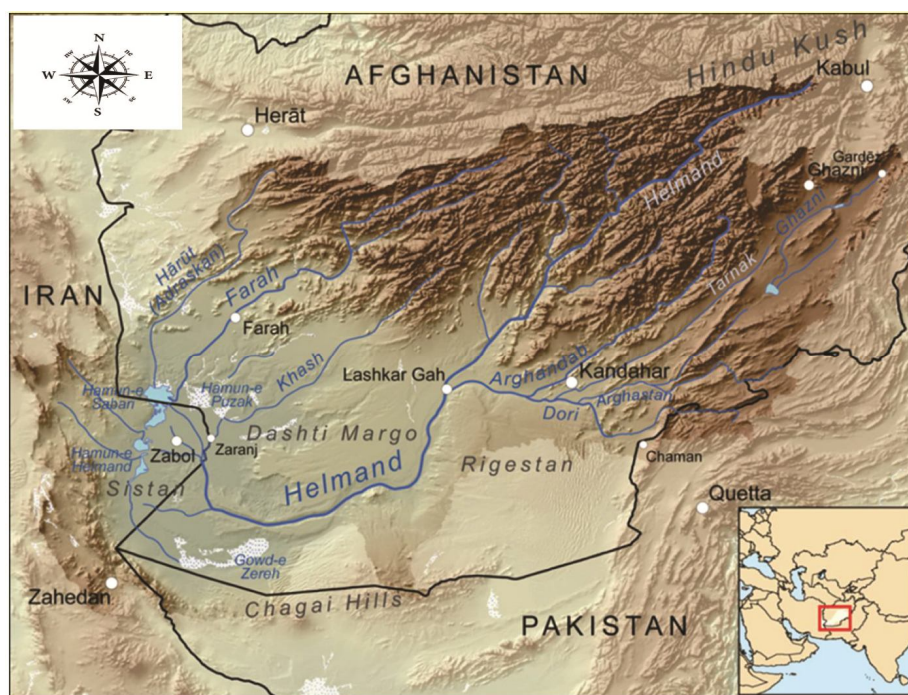
### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** دریاچه و رودخانه فصلی هامون و ذخایر چاه‌نیمه در دشت سیستان، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، حوزه هامون هیرمند، دارای وسعت ۳۴ هزار و ۲۷۳ کیلومترمربع است که ۷۴/۵ درصد سطح حوزه آبخیز در سطح استان است. رودخانه هیرمند و چاه‌نیمه، منبع اصلی تأمین آب دشت سیستان و در واقع شاه‌رگ اصلی و حیاتی منطقه سیستان است. مخازن طبیعی چاه‌نیمه به منظور ذخیره بخشی از آب مازاد رودخانه هیرمند و استفاده از این ذخیره در فصول کم آبی و خشک مورد استفاده قرار گرفت. تراز حداکثر دریاچه ۴۹۲ متر و ظرفیت کل این مخازن ۶۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. ضمن این‌که ظرفیت مفید و قابل بهره‌برداری در صورتی‌که به طور ثقلی آب از آن خارج شود ۳۴۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. این مخازن در حال حاضر آب شرب کل منطقه سیستان و شهر زاهدان را نیز تأمین می‌کند (۲).

معادل ۰/۱۲۸ می‌باشد پرداخته شد (۱۴). سلطانی و عزیزاده (۲۰۱۸)، به مدیریت جامع آب کشاورزی در مقیاس حوزه آبخیز (IWMsim) با رویکرد پویایی سیستم پرداخته‌اند. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل قادر است متغیرهای کلیدی عملکرد نسبی محصولات زراعی، تراز آب زیرزمینی و شوری آب زیرزمینی را با دقت مناسب شبیه‌سازی کند (۱۶). سانگ و همکاران (۲۰۱۸)، به کاربرد مدل‌سازی پویا برای شبیه‌سازی سیاست‌های بهینه در مورد حفاظت از آب در شهر Zhangjiakou در کشور چین پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۵، اهداف حفاظت از آب، از جمله حفظ آب و کنترل محیط آب، با نرخ کاهش سالانه انتشار گازهای گلخانه‌ای اکسیژن به میزان ۱۲/۶٪ و نرخ سالانه ناخالص ثابت سالانه ۴/۳٪ در محقق می‌شود. سیاست‌های بهینه در افزایش تأمین آب احیا شده، کاهش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و بهینه‌سازی ساختار صنایع و تقاضای آب نقش دارد (۱۷). ایکسینگ و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از سیستم‌های پویا به شبیه‌سازی پویا برای ارزیابی یکپارچه بین عوامل اقتصادی-منابع محیط در کشور چین پرداخته‌اند. نتایج ارزیابی هماهنگی براساس مدل<sup>۱</sup> CCDM نشان می‌دهد که هماهنگی سناریوی اقتصادی بدترین حالت و سناریو محیط‌زیست در کوتاه‌مدت بهترین عملکرد را دارد (۲۴).

طبق مطالعات انجام شده در حوزه آبخیز هیرمند، در طی سال‌های اخیر جمعیت افزایش یافته که با تغییرات اجتماعی-اقتصادی توأم بوده است. علاوه بر این، درآمد بسیاری از مردم منطقه سیستان کشاورزی و دامپروری بوده است، که این خود سبب افزایش نیاز در بخش کشاورزی می‌گردد. با توجه به وضعیت

1- Coupling Coordination Degree Model



شکل ۱- موقعیت قرارگیری چاه‌نیمه‌ها در حوزه آبخیز هیرمند (۲).

Figure 1. Location of wells in the Helmand catchment.

کتابخانه‌ای (بررسی اسناد، مدارک و آرشیو اطلاعات مربوط به منطقه مورد مطالعه و شبکه‌های آبیاری و زهکشی، معاونت امور آب و آبفای استان، شرکت آب منطقه‌ای سیستان و بلوچستان، وزارت جهاد کشاورزی و سازمان جهاد کشاورزی استان، آمارنامه‌های کشاورزی استان سیستان و بلوچستان، مطالعات جامع شرکت‌های مشاور آب) گرفته شده است. مقادیر متغیرهای ذخیره و ضرایب ثابت در نظر گرفته شده در مدل، در جدول ۱ آورده شده است.

مصارف آب منطقه سیستان در بخش‌های شرب، کشاورزی و محیط‌زیست از منابع آب سطحی تأمین می‌گردد. آب سطحی منطقه موردنظر از رودخانه هیرمند است. در سال‌های اخیر با افزایش جمعیت و افزایش کشت‌وکار، مصارف در بخش شرب و کشاورزی و همچنین زیست‌محیط (تالاب هامون) افزایش یافته است. این افزایش به علت اولویت تأمین آب مورد نیاز بخش شرب، کاهش حجم آب تخصیص‌یافته به بخش‌های کشاورزی و زیست‌محیطی شده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۷ از مطالعات

جدول ۱- جزئیات برخی از مقادیر مهم پارامترها و منابع تاریخی مورد استفاده در HRW – MSM.

Table 1. Details of some important values of parameters and historical sources used in HRW – MSM.

منبع Source	مقادیر اولیه مورد استفاده Initial values used	متغیرها Variables
مرکز آمار ایران و آمارنامه جهاد کشاورزی Statistics Center of Iran and Agricultural Jihad Statistics	35000 (نفر) Person	کل جمعیت Total population
	132344 (رأس) Head	دام سنگین Heavy trap
	890784 (رأس) Head	دام سبک Light trap
آمارنامه جهاد کشاورزی Agricultural Jihad Statistics	100328 (میلیون ریال) Million Rial	سرنانه درآمد خانوارهای شهری Per capita income of urban households
	170794 (میلیون ریال) Million Rial	درآمد سرنانه خالص خانوار روستایی Rural per capita net household income
	8000 (تن) Ton	عملکرد محصول Product performance
شرکت آب منطقه‌ای استان Regional Water Company of the province	330 (میلیون مترمکعب) Million Square Meter	ذخایر چاه نیمه ۱، ۲، ۳ و ۴ Chah Nimeh reserves 1, 2, 3 and 4
	0.12 (مترمکعب در روز) Cubic meters per day	سرنانه نیازی آب جمعیت شهری در هر روز The per capita need for water of the urban population every day
آمارنامه جهاد کشاورزی Agricultural Jihad Statistics	0.12 (مترمکعب در روز) Cubic meters per day	سرنانه نیازی آب جمعیت روستایی در هر روز Per capita need for water of rural population every day
	0.090 (مترمکعب در روز) Cubic meters per day	سرنانه نیازی آب دام سنگین در هر روز Per capita need for heavy livestock water every day
	0.01 (مترمکعب در روز) Cubic meters per day	سرنانه نیازی آب دام سبک در هر روز Per capita need for light livestock water every day

امکان تعریف، ذخیره، شبیه‌سازی، تحلیل و بهینه‌سازی مدل‌های سیستم داینامیک را می‌دهد (۲۳، ۲۸). نمودارهای ذخیره و جریان ترسیمی در مدل با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیل مرتبه اول (اغلب غیرخطی) که با روش‌های Runge- Kutta یا Euler حل می‌گردد، ساخته می‌شود (۲۲). توسعه مدل از کل به جز انجام می‌شود، به صورتی که به‌طور تدریجی توابع و اجزاء اتصال شده بیشتر شده تا این که مدل کامل شود (۷، ۲۵). از طرفی کاربر در زمان ساخت مدل می‌تواند به‌طور مکرر مدل را مورد برآورد و ارزیابی قرار دهد و تجزیه و تحلیل‌های مختلفی را از سیستم به‌دست بیاورد (۵ و ۱۸).

روش پویایی سیستم: رفتار سیستم‌ها از ساختار آنها نشأت می‌گیرد. این ساختار شامل حلقه‌های بازخوردی، متغیرهای حالت (انباره) و نرخ (جریان)، رفتارهای غیرخطی از تعامل میان متغیرهای مختلف و تأخیرهای آنها نشأت می‌گیرد (۱۱ و ۲۸). در مطالعه حاضر با استفاده از نرم‌افزار که یک ابزار قدرتمند شبیه‌سازی به‌منظور مدل‌سازی، شبیه‌سازی، انجام آزمون شبیه‌سازی و تحلیل سیاست‌های پیچیده نظام‌های مربوط به منابع آب می‌باشد. نرم‌افزار *Vensim* نوعی ابزار شبیه‌سازی تصویری است که به‌صورتی ساده و انعطاف‌پذیر ساخت نمونه‌های گوناگون را ممکن می‌سازد. این نرم‌افزار به کاربر

گرفته شده است. به بیان دیگر حالت مبین منبع آب و جریان نشان دهنده جریان آب ورودی یا خروجی می باشد (۶).

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Inflow(s) - Outflow(s)] ds + Stock(t_0) \quad (1)$$

نمودار ذخیره و جریان (SFD): زیرسیستم های مدل HRW - MSM براساس نمودارهای حلقه های علی و معلولی آنها توسعه یافته اند تا سبب توصیف بهتر تجمع و نقصان شده و روند جریان مواد در سیستم را تعیین نمایند. نمودار ذخیره و جریان حوزه آبخیز رودخانه هیرمند از نمودارهای ذخیره و جریان زیرسیستم های جمعیت، کشاورزی، اجتماعی - اقتصادی، تأمین و نیازی آب و زیست محیطی تشکیل شده است که به ترتیب در شکل های ۲ تا ۶ نشان داده شده است. متغیرهای ذخیره سیستم شامل جمعیت، دام سنگین، دام سبک، عملکرد محصول، نرخ خودکفایی مواد غذایی، سرانه دستمزد خانوار شهری و روستایی و حجم ذخایر مخازن چاه نیمه می باشد. این متغیرهای ذخیره با تغییر در نرخ ورودی یا خروجی متغیرها افزایش یا کاهش می یابند.

نمایش ریاضی حالت و جریان: نشانه های استفاده شده جهت ترسیم نمودارهای ذخیره - جریان نخستین بار توسط فارستر ارائه شد و از مباحث هیدرولیکی

میزان تغییرات حالت در واحد زمان برابر است با نرخ خالص افزایش حالت و یا نرخ ورودی و خروجی:

$$\frac{d(Stock)}{dt} = Inflow(t) - Outflow(t) \quad (2)$$

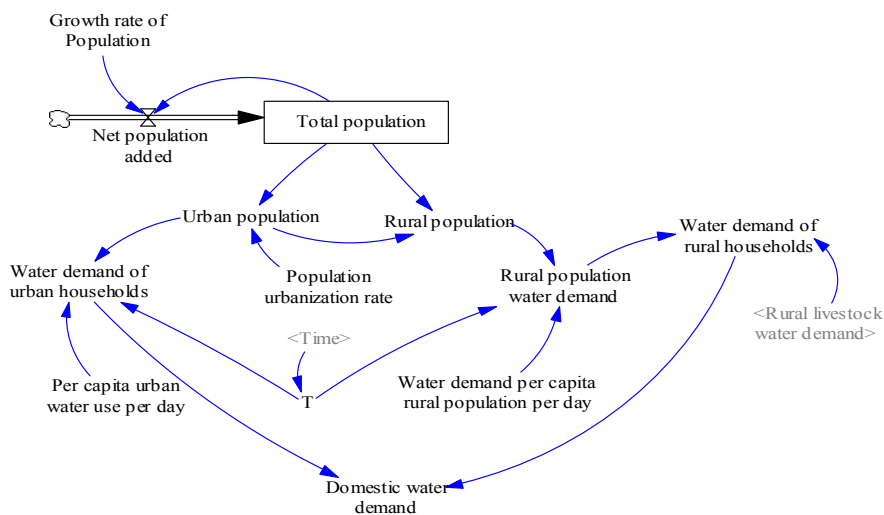
مدل سازی جامع سیستم منابع آب حوزه آبخیز هیرمند: مراحل مختلف مدل سازی با رویکرد پویایی سیستم ها به صورت مراحل سه گانه ذیل انجام می گردد:

الف) تعریف مسأله

ب) شرح سیستم

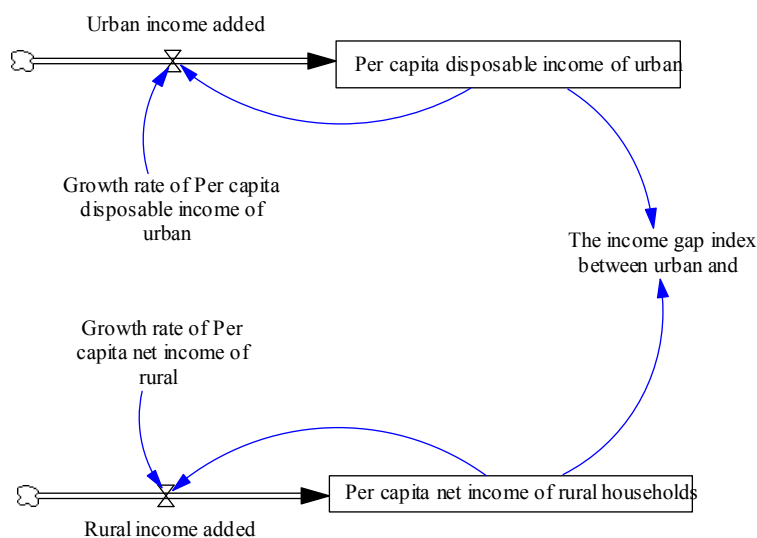
ج) توسعه مدل

مدل مدیریت و پایداری حوزه آبخیز هیرمند (HRW-MSM): مدل مدیریت و پایداری حوزه آبخیز هیرمند با رویکرد یکپارچه سازی بر مبنای تئوری دینامیک سیستم ها توسعه یافته است.



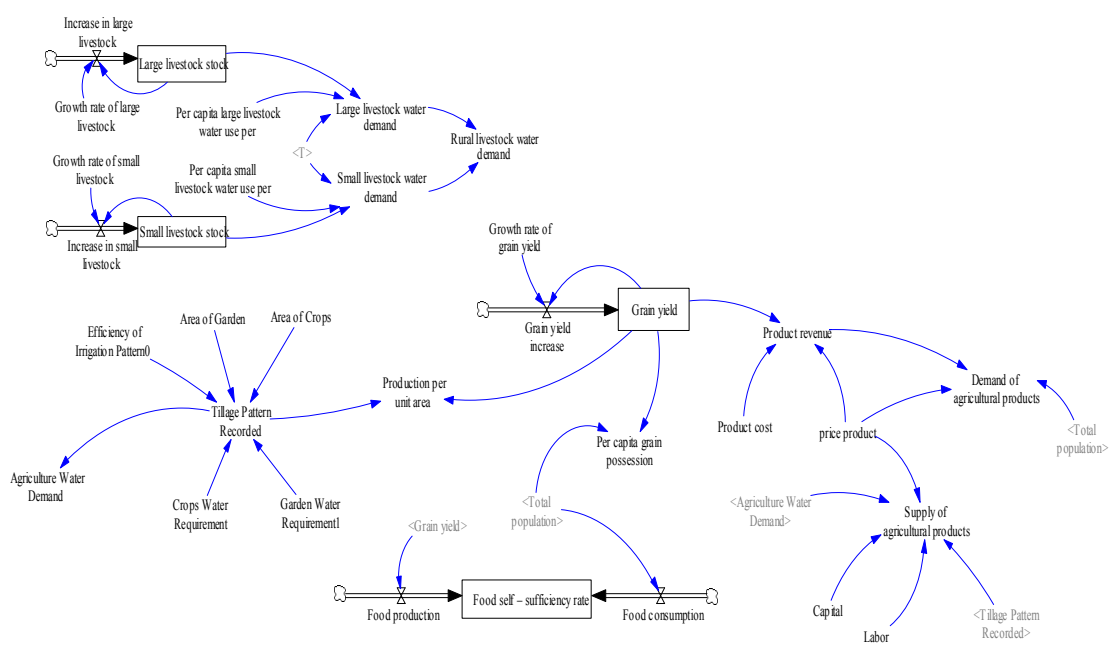
شکل ۲- نمودار ذخیره - جریان زیر سیستم جمعیت.

Figure 2. Stock - flow diagram of population subsystem flow.



شکل ۳- نمودار ذخیره - جریان زیر سیستم اقتصادی - اجتماعی.

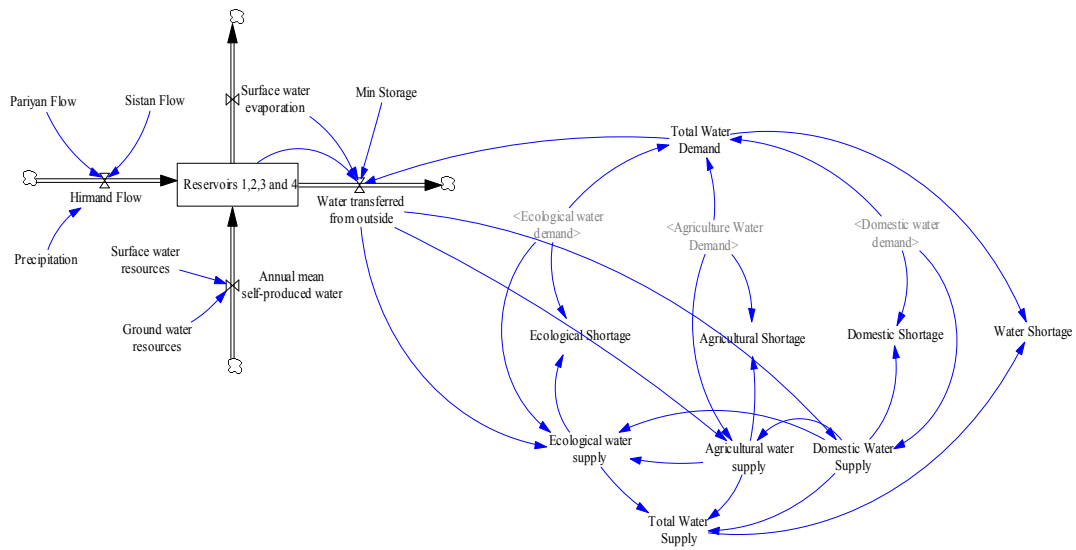
Figure 3. Stock - flow diagram of socio - economic subsystem.



شکل ۴- نمودار ذخیره - جریان زیر سیستم کشاورزی.

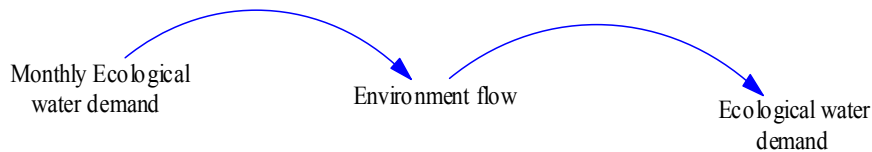
Figure 4. Stock - flow diagram of agricultural subsystem.





شکل ۵- نمودار ذخیره - جریان زیر سیستم عرضه و تقاضای آب.

Figure 5. Stock - flow diagram of water supply and supply subsystem.



شکل ۶- نمودار ذخیره - جریان زیر سیستم زیست محیطی.

Figure 6. Stock - flow diagram of ecosystem subsystem.

به منظور مفید بودن یک مدل باید بینیم آیا چیزهایی که در واقعیت مشاهده می شود، در مدل وجود دارند. توجه به این نکته حائز اهمیت است که هیچ وقت نمی توان ادعا کرد که یک مدل بطور کامل با واقعیت مطابقت دارد و معتبر است. در عوض باید سعی شود که در صورت امکان به واقعیت نزدیک باشد. صحت سنجی مدل با استفاده از روش های رسمی و غیررسمی مختلفی انجام می گیرد (۱۵). از رایج ترین آزمون های اعتبارسنجی، مقایسه نتایج مدل با اطلاعات مشاهده شده (آزمون تکرار رفتار) و آزمون شرایط حدی می باشد. توجه به این نکته لازم است که درجه اطمینان پذیری از صحت مدل به نگاه مدل ساز طبق مد پویا بستگی دارد و به هدف های مدل ساز ارتباط دارد.

در این پژوهش، ابتدا مدل مفهومی تبیین شده برای منطقه مورد مطالعه سیستم در حوزه آبخیز هیرمند شامل ۵ زیرسیستم شامل جمعیت، کشاورزی، عرضه و تقاضای آب، اقتصادی- اجتماعی و زیست محیطی گسترش داده شده است. سپس با توجه به نمودارهای علی و معلولی زیرسیستم ها، نمودارهای ذخیره- جریان ترسیم شده است. علاوه بر این، معادلات حاکم بر متغیرها وارد مدل گردیده و مدل صحت سنجی شد. در آخر اعمال سناریوهایی چون راندمان آبیاری و کاهش تلفات آب (کاهش تبخیر به میزان ۵۰٪) انجام شد.

کالیبراسیون و صحت سنجی مدل: مدل ها نمایشی از واقعیت ها یا تصور و شناخت ما از حقیقت هستند.

معیار نش- ساتکلیف نیز از رابطه زیر به دست می‌آید که دامنه تغییرات آن از منفی بینهایت تا ۱ را شامل می‌شود. هرچه این معیار به ۱ نزدیک‌تر باشد صحت‌سنجی مدل دقیق‌تر خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ بیانگر عملکرد قابل قبول مدل می‌باشد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum (y_{m,i} - y_{s,i})^2}{\sum (y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $y_{m,i}$  مقدار داده محاسباتی و  $y_{s,i}$  نمایانگر داده مشاهداتی می‌باشد.  $\bar{y}_{m,i}$  و  $\bar{y}_{s,i}$  مقدار میانگین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی می‌باشد.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

که در آن،  $y_i$  مقدار اندازه‌گیری شده و  $\hat{y}_i$  مقدار پیش‌بینی شده برای متغیر مورد نظر از داده‌های اعتبارسنجی است. شاخص RMSE نیز بیانگر میزان دقت پیش‌بینی است. مقادیر شاخص فوق در بهترین حالت (نا اریبی) باید تا حد امکان کوچک و نزدیک به صفر باشد.

### نتایج و بحث

**نتایج کالیبراسیون:** در جدول ۲ مقادیر ضریب تعیین بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده تمامی متغیرهای سطح بالاتر از ۷۰ درصد است و تمامی مقادیر در معیار نش- ساتکلیف (NSE) مقدار آن بیش‌تر از ۰/۵ و همچنین مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) کم‌تر از ۰/۳ است که این نتایج مبنای خوبی برای اعتبارسنجی مدل و پیش‌بینی‌های ساخته شده با استفاده از مدل ارائه می‌دهد.

در این پژوهش از آزمون تکرار رفتار استفاده شده است.

**آزمون تکرار رفتار:** به بررسی نتایج مدل از طریق مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهده شده پرداخته می‌شود. در آزمون روند داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل با داده‌های مشاهده شده مطابقت داده می‌شود. به علت این‌که هر یک از ابزارهای آماری در راستای مقایسه داده‌های تاریخی و تولیدشده دارای محاسن و معایبی در بررسی‌های آماری است، در این آزمون ابتدا داده‌های تاریخی و داده‌های تولیدشده ترسیم شده، سپس تست خطا با استفاده از ضریب تعیین  $R^2$ ، معیار نش- ساتکلیف و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) برای ارزیابی عملکرد بیش‌تر مدل انجام می‌شود (۴).

برای ارزیابی بهتر عملکرد مدل، کل سری زمانی به دو مجموعه داده تقسیم می‌گردد. بخش اول، شامل داده‌های ۱۳۸۹-۱۳۷۹ که برای مدل کالیبره‌سازی استفاده می‌شود و یک مجموعه داده دیگر در سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۹۷ برای اعتبارسنجی مدل استفاده می‌شود. شش متغیر ذخیره برای انجام کالیبراسیون و اعتبارسنجی، شامل جمعیت کل، دام سنگین، دام سبک، سطح زیرکشت، عملکرد محصول، ذخایر چاه‌نیمه، سرانه دستمزد خانوار شهری و سرانه دستمزد خانوار روستایی مورد استفاده می‌شود.

ضریب تعیین بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده می‌باشد. این ضریب در واقع نتایج تقریبی پارامتر مورد نظر در آینده را براساس مدل ریاضی تعریف شده که منطبق بر داده‌های موجود است، بیان می‌دارد و با رابطه زیر محاسبه می‌گردد. این شاخص بین صفر و یک متغیر است.

$$R^2 = \frac{[\sum (y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})]^2}{\sum (y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})^2 \sum (y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (1)$$

نتایج اعتبارسنجی: اکثر مقادیر مطلوب معیار نش - ساتکلیف (NSE) بیش تر از ۰/۵ و خطای جذر میانگن مربعات (RMSE) عددی نزدیک به صفر دارد (جدول ۲). علاوه بر این، ضریب تعیین ( $R^2$ ) بیش تر از ۰/۸۰ می باشد.

جدول ۲- آزمون های مدل پارامترهای آماری.

Table 2. Statistical parameters model tests.

اعتبارسنجی Validation					کالیبراسیون Calibration					متغیرها Variables	
$R^2$		NSE (RMSE)			$R^2$		NSE (RMSE)				
1391-1397	1397	1395	1393	1391	1379-1390	1388	1386	1384	1382	1380	سال Year
0.91	0.94 (0.27)	0.98 (0.28)	0.93 (0.28)	0.96 (0.28)	0.94	0.99 (0.28)	0.99 (0.28)	0.69 (0.24)	0.87 (0.27)	0.97 (0.28)	جمعیت کل Total population
0.83	0.97 (0.28)	0.98 (0.28)	0.99 (0.28)	0.96 (0.28)	0.82	0.83 (0.26)	0.96 (0.14)	0.89 (0.27)	0.84 (0.26)	0.69 (0.24)	دام سنگین Heavy trap
0.92	0.79 (0.25)	0.46 (0.19)	0.96 (0.28)	0.06 (0.07)	0.99	0.99 (0.28)	0.95 (0.19)	0.79 (0.25)	0.90 (0.27)	0.96 (0.28)	دام سبک Light trap
0.93	0.84 (0.26)	0.80 (0.25)	0.81 (0.26)	0.69 (0.24)	0.89	0.99 (0.28)	0.99 (0.28)	0.99 (0.28)	0.99 (0.28)	0.96 (0.28)	عملکرد محصول Product performance
0.84	0.77 (0.25)	0.81 (0.26)	0.88 (0.27)	0.56 (0.12)	0.82	0.93 (0.27)	0.80 (0.08)	0.72 (0.24)	0.97 (0.28)	0.57 (0.21)	ذخایر چاه نیمه Chah Nimeh reserves
0.92	0.99 (0.28)	0.97 (0.28)	0.97 (0.28)	0.84 (0.26)	0.96	0.78 (0.25)	0.96 (0.28)	0.97 (0.28)	0.99 (0.28)	0.99 (0.28)	سرانه دستمزد خانوار شهری Urban household per capita wage
0.85	0.99 (0.28)	0.92 (0.27)	0.97 (0.28)	0.97 (0.28)	0.94	0.94 (0.27)	0.92 (0.28)	0.94 (0.28)	0.99 (0.28)	0.97 (0.28)	سرانه دستمزد خانوار روستایی Rural per capita wage

مدیریت نیاز باید مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، می توان از راهکارهای پیشنهادی قابل اجرا با هدف مدیریت مصرف، برای رساندن وضعیت سیستم به یک سطح قابل قبول و مطمئن استفاده نمود. با استفاده از رویکرد پویایی سیستم می توان تأثیر شرایط مختلف را در مدیریت سیستم و اثرات طولانی مدت آن ها را مورد تحلیل قرار داد و با توجه به این تأثیرات سیاست های مناسب را اتخاذ کرد.

طراحی سناریوهای مختلف در بهینه سازی بهره برداری از مخازن چاه نیمه در حوزه هیرمند: بر اساس نتایج مدل پویایی سیستم حوزه آبخیز هیرمند، در سال های آتی مقادیر نیازی آب از منابع مخازن چاه نیمه افزایش خواهد یافت. با کاهش جریان ورودی به مخازن در اثر تغییر اقلیم، مقادیر کمبودها با شدت بیشتری افزایش می یابد. بر طبق نتایج ارائه شده، تأمین نیازهای آبی از مخازن چاه نیمه در حوزه هیرمند در سال های آینده غیرممکن می گردد. در این شرایط بحرانی،

نشان‌دهنده افزایش ۱۱/۶۳۹ درصدی نسبت به سال پایه است. عملکرد محصول افزایشی ۳۲/۱۶۲ درصدی نسبت به سال ۱۳۷۹ داشته است. نتایج سرانه عملکرد محصول و تولید در واحد سطح روندی رو به کاهش را نشان می‌دهد، از طرفی خودکفایی مواد غذایی نسبت به سال پایه، ۳۷/۰۳۹ درصد کاهش یافته است. این نتیجه نشان می‌دهد که مواد غذایی باید از سایر مناطق برای مصرف وارد شود و منطقه سیستان در آینده از ناامنی غذایی برخوردار خواهد شد. در مدیریت منابع آب، تولید مواد غذایی از جمله مشکلات نگران کننده در منطقه باقی خواهد ماند.

در زیرسیستم تأمین و نیاز آب، تأمین آب نسبت به سال پایه از ۴۳۳/۵۶۲ به ۵۸۲/۵۲۷ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۱۰ رسیده. در صد رشد افزایشی، ۳۴/۳۵۸ برابری خواهد داشت و از طرفی با افزایش رشد ۱۲/۲۹۰ برابر نیاز آب روبه‌رو خواهیم شد. با توجه به تأمین و نیاز آب در سال ۱۴۱۰ نسبت به سال پایه با کمبود ۲/۰۱۱ درصدی رو به افزایش مواجه خواهیم شد. در زیرسیستم زیست‌محیطی با توجه به نیاز ۵۹/۹۹۱ میلیون مترمکعب و تأمین ۵/۰۹۵ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۱۰ منطقه سیستان با کمبودی معادل ۸/۵۰۳ درصد مواجه خواهد شد.

با توجه به رفتار نیاز منابع آب در شکل ۷، بیش‌ترین مصرف آب برای بخش کشاورزی می‌باشد و روند نیاز آب شرب و نیاز آب زیست‌محیطی نسبتاً صاف است.

در این مرحله از پژوهش، سیاست‌های مدیریتی در مدل پویایی سیستم حوزه آبخیز هیرمند شبیه‌سازی شده است. در این راستا می‌توان با سیاست‌های اصلاح الگوی مصرف در بخش‌های مختلف از تشدید بحران جلوگیری نمود. سناریوهای پیشنهادی و نتایج حاصل در ادامه تشریح شده است.

**سناریو پایه<sup>۱</sup> (BAU):** سناریو یک، ادامه شرایط موجود در حوزه رودخانه هیرمند می‌باشد. بدین معناست که اگر هیچ فعالیت مدیریتی انجام نگردد، از لحاظ جمعیتی، کشاورزی، اقتصاد و اجتماعی، تأمین و نیاز آبی و زیست‌محیطی در آینده این حوزه چه وضعیتی را به دنبال خواهد داشت. نتایج شبیه‌سازی توسعه آینده تحت سناریو BAU در جدول ۳ نشان داده شده است. در زیر سیستم جمعیت، جمعیت کل در سال ۱۴۱۰ به ۹۲۱۴۱۸ نفر رسیده است و رشد جمعیت ۱۱۶/۸۸۶ درصد بیش‌تر از سال ۱۳۷۹ می‌باشد. زیرسیستم اقتصادی-اجتماعی در سال ۱۴۱۰ درآمد سرانه خانوار شهری و روستایی به ۴۹۴/۵۷ و ۴۴۹/۵۹ میلیون ریال می‌رسد، که نسبت به سال پایه درصد رشدی معادل ۳۰۲/۵۸۰ و ۱۱۶/۹۲۱ را دارد. شاخص شکاف درآمدی بین خانوار شهری و روستایی از ۷/۱۱ به ۱۳/۱۹۵ در سال ۱۴۱۰ افزایش می‌یابد که این شاخص درصد رشد ۸۵/۵۸۴ برابری از سال ۱۳۷۹ به ۱۴۱۰ را داشته است. این نتیجه نشان‌دهنده افزایش روزافزون شکاف درآمدی میان خانوار روستایی و شهری و یکی از عمده دلایل آن می‌تواند نبود آب کافی و عدم کشت خانوارهای روستایی باشد.

در زیرسیستم کشاورزی، سطح زیرکشت در سال ۱۴۱۰ به ۱۳۸۰۱۲ هکتار می‌رسد، این مقدار

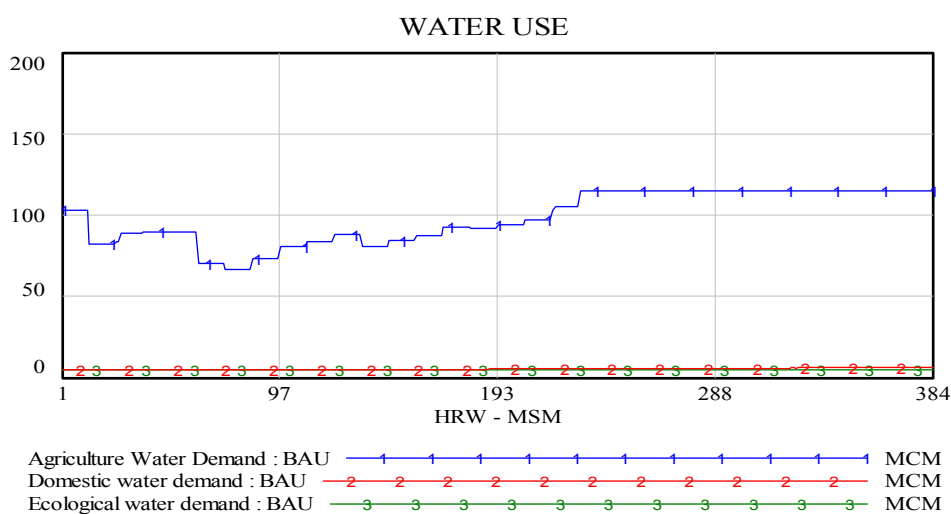
1- Business as usual

جدول ۳- مقادیر شبیه‌سازی متغیرهای کلیدی در سناریو BAU.

Table 3. Simulation values of key variables in the BAU scenario.

رشد (%) Growth	1410	1404	1400	1379	واحد unit	متغیرها Variables	زیر سیستم Subsystem
116.886	921418	793197	717787	424840	نفر Person	جمعیت کل Total population	
116.890	322494	277615	251222	148690	نفر Person	جمعیت شهری Urban population	جمعیت population
116.888	598920	515577	466561	276143	نفر Person	جمعیت روستایی Rural population	
302.580	494.57	377.72	315.6	122.85	میلیون ریال Million Rials	سرانه دستمزد شهری Per capita urban wage	
116.921	449.59	387.01	350.2	207.26	میلیون ریال Million Rials	سرانه دستمزد روستایی Rural per capita wages	اقتصادی - اجتماعی Socio-economic
85.584	13.195	11.711	10.813	7.113	%	شاخص شکاف درآمدی Income gap index	
11.639	138012	138012	138012	123624	هکتار Hectares	سطح زیرکشت Area under cultivation	
32.162	127399	120703	116437	96396	تن Ton	عملکرد محصول Product performance	
-39.037	8.295	9.130	9.733	13.608	%	نرخ خودکفایی مواد غذایی Food self-sufficiency rate	کشاورزی Agriculture
-39.062	1659.22	1826.17	1946.68	2722.81	کیلوگرم/نفر Kg / person	سرانه عملکرد محصول Per capita product performance	
18.393	1107.65	1049.43	1012.34	935.57	کیلوگرم/سطح زیرکشت Kg / area under cultivation	تولید در واحد سطح Production per unit area	
34.358	582.527	516.491	547.06	433.562	میلیون مترمکعب Million Square Meter	تأمین آب Water supply	
12.390	1515.93	1510.25	1506.9	1350.01	میلیون مترمکعب Million Square Meter	نیاز آب Water demand	تأمین و نیاز آب Water supply and demand
-2.011	-968.83	-993.7	-957.33	-970.33	میلیون مترمکعب Million Square Meter	کمبود آب water shortage	
5.095	5.095	5.095	5.095	0	میلیون مترمکعب Million Square Meter	تأمین زیست‌محیطی Environmental security	
0.00	59.991	59.991	59.991	59.991	میلیون مترمکعب Million Square Meter	نیاز زیست‌محیطی Environmental demand	زیست‌محیطی Environmental
-8.503	-54.896	-54.896	-54.896	-5.991	میلیون مترمکعب Million Square Meter	کمبود زیست‌محیطی Lack of environmental	

توجه: رشد از مقادیر پیش‌بینی شده در سال ۱۴۱۰ تا سال ۱۳۷۹ محاسبه می‌شود.



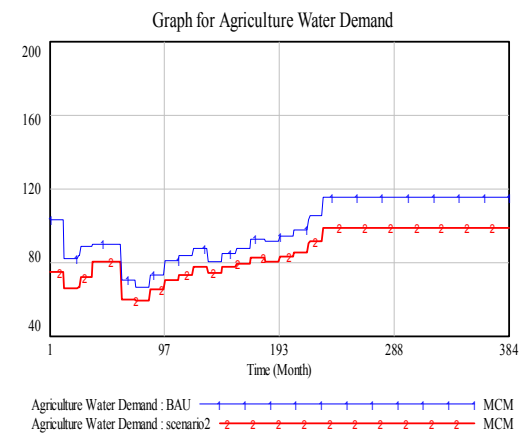
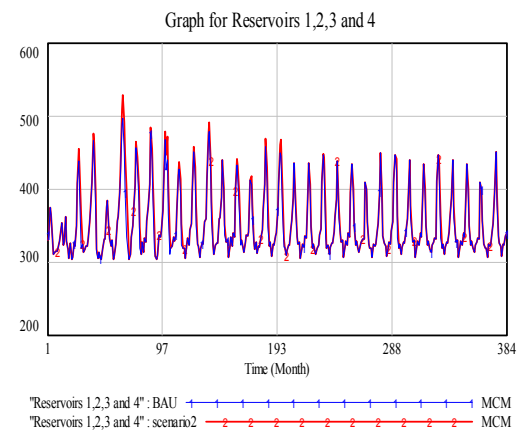
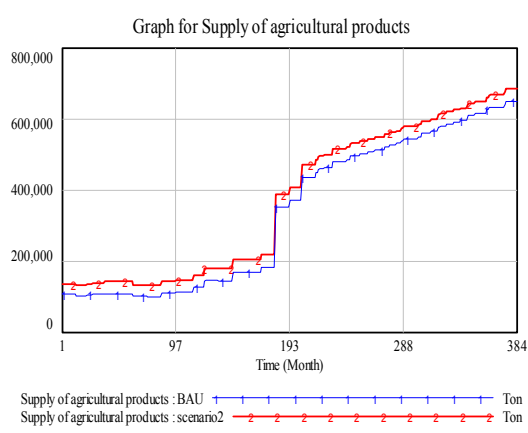
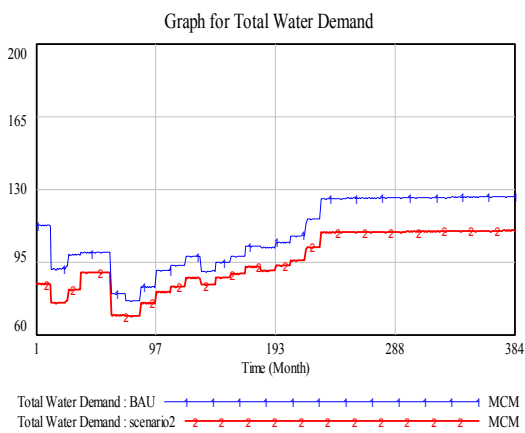
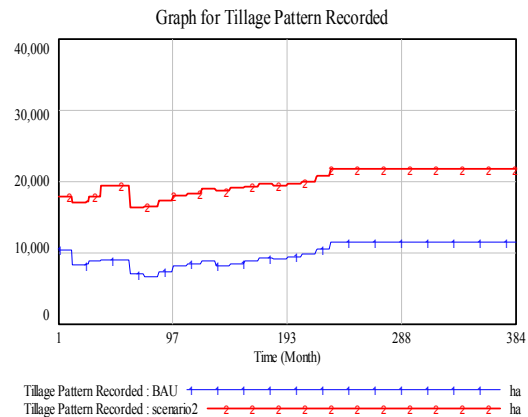
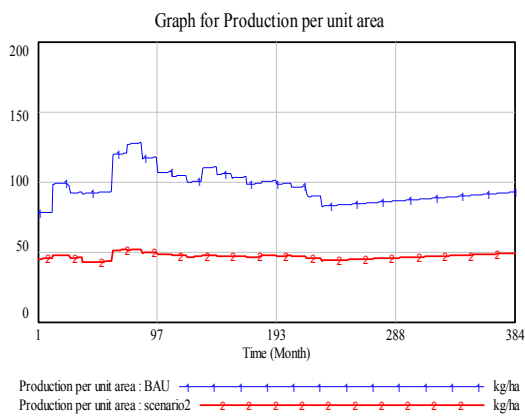
شکل ۷- رفتار متغیر نیازهای آب تحت سناریو BAU.

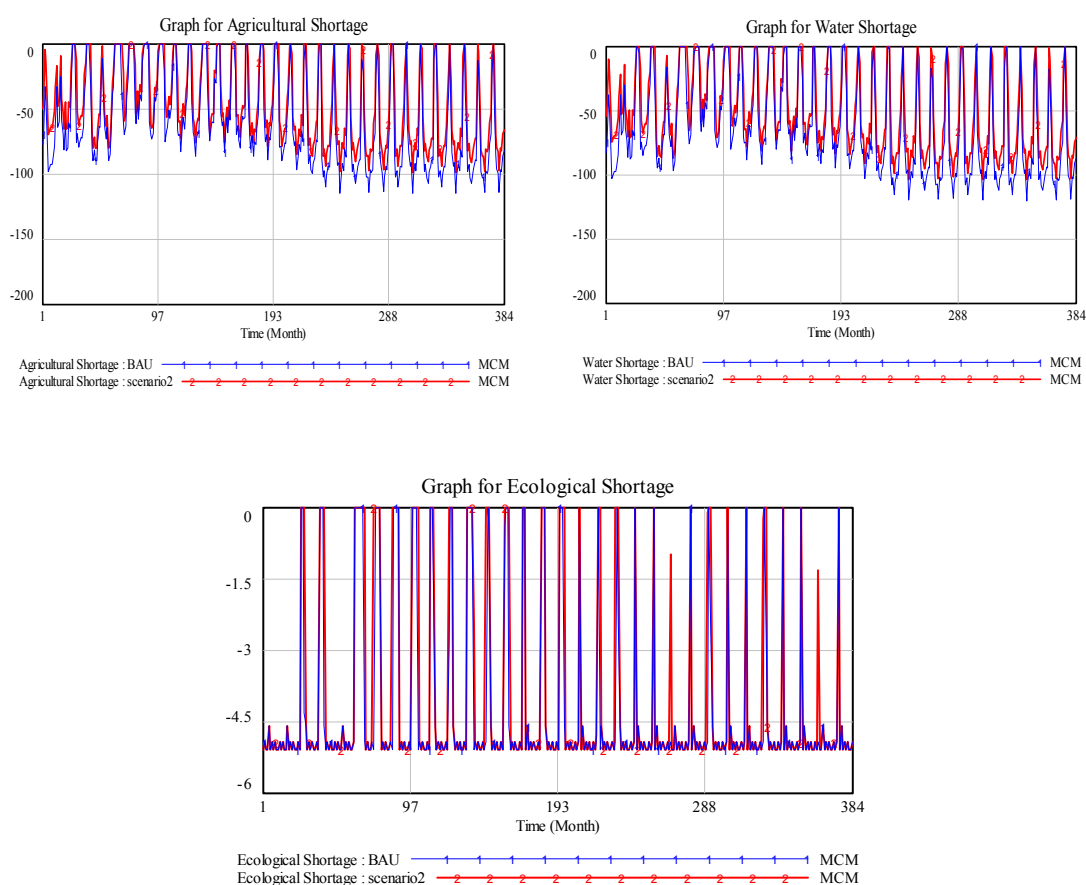
Figure 7. Variable behavior of water needs under BAU scenario.

این مقدار ۱۹۵/۹۶ میلیون مترمکعب مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد و ۰/۰۴ میلیون مترمکعب به بخش زیست‌محیطی مربوط می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد این سناریو نسبت به سناریو اول رشد بیش‌تری داشته است، بنابراین افزایش راندمان آبیاری بر کاهش تقاضای آب این بخش و هم‌چنین کاهش کمبود در سیستم اثرگذار است. در شرایط حاضر بخش کوچکی از اراضی منطقه سیستان به سیستم‌های آبیاری مدرن آبیاری می‌گردد. افزایش بهره‌وری مصرف نیازمند برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری مناسب می‌باشد. اعمال سیاست‌های تشویقی و حمایتی از طرح‌های بهینه مصرف آب می‌تواند در افزایش راندمان تأثیرگذار واقع گردد.

راندمان آبیاری ۷۰ درصد در بخش کشاورزی: راندمان آبیاری را براساس سیستم آبیاری مدرن (تحت فشار قطره‌ای) در منطقه سیستان می‌توان به ۷۰ درصد در بخش کشاورزی افزایش داد (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). طبق نتایج به‌دست آمده در این سناریو براساس مدل سیستم داینامیک (SDM)، در زیر سیستم کشاورزی سطح زیرکشت و عرضه محصولات کشاورزی در سال‌های ۱۴۰۰، ۱۴۰۴ و ۱۴۱۰ به میزان ۱۹۵۹۶ هکتار و ۶۷۸۲۴ هزار تن نسبت به سال پایه کاهش یافته و تولید در واحد سطح در سال‌های ۱۴۰۰، ۱۴۰۴ و ۱۴۱۰ به مقدار ۱۶۷/۵۶، ۱۷۳/۷۱ و ۱۸۳/۳۲ کیلوگرم در هکتار افزایش یافته است.

در زیر سیستم عرضه تقاضای آب میزان تقاضا به ۱۹۶ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت که از





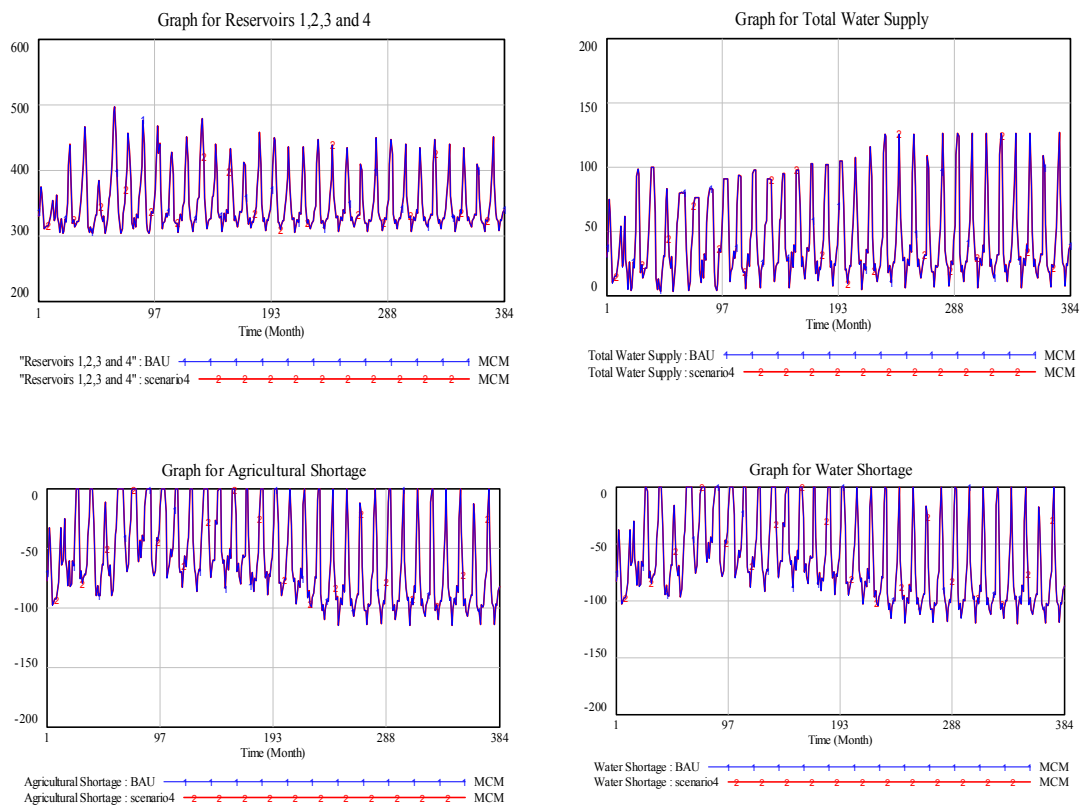
شکل ۸- رفتار متغیرهای نیاز آب، نیاز کشاورزی، ذخایر چاه نیمه، کمبود آب، کمبود کشاورزی و زیست‌محیطی در scenario 2.

Figure 8. Behavior of variables of water requirement, agricultural requirement, semi-well reserves, water scarcity, agricultural scarcity and environment in scenario 2.

کمبود آب کل در سال‌ها ۱۴۰۰، ۱۴۰۴ و ۱۴۱۰ به ترتیب ۱/۹، ۱/۸۹ و ۱/۹ میلیون مترمکعب و کمبود آب در بخش کشاورزی به میزان ۱/۸۸، ۱/۸۹ و ۱/۹ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. با توجه به نتایج ارائه شده میزان تبخیر از سطح آب‌های آزاد با توجه به درجه حرارت بالا در حوزه هیرمند راهکارهای علمی و مدرن جهت کاهش میزان تبخیر با در نظر گرفتن شرایط زیست‌محیطی و سطح کیفی آب به منظور بررسی و امکان‌سنجی در منطقه سیستان و تالاب بین‌المللی هامون پیشنهاد می‌شود.

کاهش تلفات آب (کاهش تبخیر به میزان ۵۰٪): این سناریو با کاهش ۵۰ درصدی تبخیر از میزان اتلاف آب جلوگیری می‌کند. با اعمال کاهش تبخیر به میزان ۵۰ درصد از سطح آب‌های آزاد سبب اثرگذاری بر متغیرهای تأمین آب، ذخایر چاه نیمه، کمبود آب و کمبود کشاورزی در زیرسیستم عرضه و تقاضای می‌گردد به طوری که در میزان حجم عرضه آب در سال‌های ۱۴۰۰، ۱۴۰۴ و ۱۴۱۰ آب به ترتیب ۱/۸۹، ۱/۸۸۳ و ۱/۹۱۳ میلیون مترمکعب افزایش یافته و میزان ذخایر چاه نیمه ۰/۲۷ میلیون مترمکعب در سال‌های مذکور افزایش داشته است. از طرفی مقدار





شکل ۹- رفتار متغیرهای تأمین آب، ذخایر چاه نیمه، کمبود آب و کمبود کشاورزی در Scenario 4.

Figure 9. Behavior of water supply variables, semi-well reserves, water scarcity and agricultural scarcity in Scenario 4.

سال‌های آینده افزایش می‌یابد. میزان کل تقاضا در سال ۱۴۱۰ از ۱۳۵۰/۰۱ به ۱۵۱۵/۹۳ میلیون مترمکعب می‌رسد که تأمین نیازها با وجود کاهش منابع سیستم غیرممکن خواهد شد. بیش‌ترین افزایش در میزان تقاضاها در بخش کشاورزی و شرب خواهد بود. به‌علت افت قابل‌ملاحظه تراز آب چاه‌نیمه‌ها در منطقه به‌علت کاهش جریان هیرمند، اولویت تخصیص در بهره‌برداری از مخازن چاه‌نیمه به نیاز شرب داده شده است. میزان کمبود آب برای بخش‌های مصرف‌کننده در طی ماه‌های مختلف نیز به‌دست آمد. بیش‌ترین کمبود مربوط به بخش کشاورزی است که در حدود ۸۰ درصد کل کمبودها را تشکیل می‌دهد. نتایج حاصل از این مطالعه با مطالعات مردانی و مارینو (۲۰۰۹)، کویین و همکاران (۲۰۱۱)، دایی و

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با هدف بررسی اثرات متقابل زیرسیستم‌های جمعیت، کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی، عرضه و تقاضای آب و زیست‌محیطی حوزه هیرمند، مدلی جامع براساس پویایی سیستم‌ها گسترش داده شد. در این رویکرد، روابط و بازخورد میان متغیرهای موجود در زیرسیستم‌ها با نمودار ذخیره و جریان بیان گردیده شد. مدل حاضر با استفاده از آزمون تکرار رفتار کالیبراسیون و صحت‌سنجی شد. نتایج به‌دست آمده از آزمون نشان داد که مدل شبیه‌سازی شده، نتایج و رفتار قابل‌قبول با مشاهدات واقعی داده است.

براساس نتایج به‌دست آمده، مقادیر تقاضا برای نیازهای مختلف کشاورزی، شرب و محیط زیست در

سناریوهای بررسی شده، شامل راندمان آبیاری ۷۰ درصد در بخش کشاورزی و کاهش تلفات آب (کاهش تبخیر به میزان ۵۰٪) در حوزه هیرمند می‌باشند. با بررسی نتایج این سناریوها مشاهده می‌گردد که هر یک از این راهکارها، باعث کاهش کمبود آب در سال‌های آتی می‌گردد ولی بهترین نتیجه در سناریوی اول (راندمان آبیاری ۷۰ درصد در بخش کشاورزی) حاصل شده است. در سناریو اول، مقدار کمبود کلی در سال ۱۴۱۰ نسبت به حالت پایه ۱۹۶ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. در سناریو دوم، میزان کاهش ۱/۹ میلیون مترمکعب بوده است. سناریو افزایش راندمان نیز نتیجه خوبی را در کاهش کمبودها نشان داده است.

### تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان از دانشگاه سیستان و بلوچستان که امکانات لازم برای انجام این پژوهش را فراهم کرد کمال تشکر و سپاس را دارند.

### داده‌ها و اطلاعات

داده‌ها و اطلاعات این مقاله از رساله دکتری نویسنده اول که در دانشگاه سیستان و بلوچستان در سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۹ اجرا شده است استخراج گردیده است.

### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

همکاران (۲۰۱۳)، حسینی و باقری (۲۰۱۴)، رحیمی‌خوب و همکاران (۲۰۱۶)، مهرآذر و همکاران (۲۰۱۷)، پیش‌بهار و رحیمی (۲۰۱۸)، ایکسو و همکاران (۲۰۱۷)، کوتیر و همکاران (۲۰۱۷)، ژانگ و همکاران (۲۰۱۷)، پلوچینوتا و همکاران (۲۰۱۸)، ژانگ و شائو (۲۰۱۸) و سونک و همکاران (۲۰۱۸)، (۲۶ و ۲۷) نتایج مبتنی بر سناریو راندمان آبیاری و سناریوهای اقلیمی نشان می‌دهد که بهبود بهره‌وری آب، مؤثرترین ابزار برای حمایت از توسعه سریع اقتصادی و اجتماعی و بهبود کیفیت محیط‌زیست است. بر این اساس، ارائه راهکارهای مدیریتی در راستای کاهش تلفات آب در بخش کشاورزی و در نتیجه کاهش تقاضای آب در این بخش، اهمیت بیش‌تری می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد که ادامه روند مصرف فعلی و به تبع آن ادامه برداشت از منابع آب با همین روند، اثرات جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت. در این وضعیت مدل‌سازی مصرف بهینه در بخش‌های مختلف، رعایت شرایط حدی و فرهنگ‌سازی مبتنی بر عدم اسراف جزو مسائل کلیدی در مدیریت بحران می‌باشد و یکی از اساسی‌ترین پایه‌های مدیریت مصرف می‌باشد.

برای رویارویی با شرایط بحرانی و بازنگری در مصارف مخازن باید راهکارهایی پیدا کرد. ارزیابی رفتار مدل برای سناریوهای مختلف مدیریتی نگرش کاملی را از طبیعت پویای آن نشان می‌دهد. این ارزیابی در دو سناریو به انجام رسیده است. راهکارهای پیشنهادی باید ضمن قابل اجرا بودن، سیستم را به سطح قابل قبولی در تأمین نیازها برساند.

منابع

1. Alami, M.T., Aghabalai, B., Ahmadi, M.H., and Farzin, S. 2015. Optimal Allocation of Water Resource Systems Using Dynamic System, Journal of Water Resources Engineering, Seventh Year, Pp: 99-99.
2. Atay Kia, A., Shahbazi, A.R., and Ramesht, M.H. 2017. Geomorphological development of wells, Geographical studies of arid regions, 6: 24. 118-104.
3. Azizi, Q.H., Nazif, S., and Abbasi, F. 2017. Evaluation of Operation Performance of Urmia Catchment Dams Using Systems Dynamics Approach, Geographical Studies of Dry Areas, Volume 7, Number Twenty-Five, pp. 63-48.
4. Chen, Z., and Wei, S. 2014. Application of system dynamics to water security research. Water resources management, 28: 2. 287-300.
5. Elsworth, S., Pierce, S.A., Hamilton, S.H., Delden, H.V., Haase, D., Elmahdi, A., and Jakeman, A.J. 2017. An overview of the system dynamics process for integrated modelling of socio-ecological systems: Lessons on good modelling practice from five case studies, Environmental Modelling & Software, volume 93, July 2017, Pp: 127-145.
6. Forrester, J.W. 1961. Industrial dynamics, 1st edn, [Cambridge, Mass.] M.I.T. Press, England, 464p.
7. Jalali, M., Sharafi Avarzaman, Z., Rahmandad, H., and Ammerman, A. 2016. Social influence in childhood obesity interventions: a systematic review. Obesity Reviews, 17: 9. 820-832.
8. Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. 1981. Water resources systems planning and analysis. 1<sup>th</sup> Ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
9. Loucks, D.P., Beek, E.V., Stedinger, J.R., Dijkaman, J.P.M., and Villars, M.T. 2005. Water resources system planning and management: An Introduction to methods, models and application. 1<sup>th</sup> Ed., UNESCO, Paris.
10. Mehr Azar, A., Masah Boani, A.R., Mashal, M., and Rahimi-Khob, H. 2017. Integrated Modeling of Water Resources, Agricultural and Socio-Economic Systems of Hashtgerd Plain with Dynamic Systems Approach, Water and Irrigation Management, 6: 2. 279-263.
11. Niazi, A.S., Prasher, J., and Adamowski, T. Gleeson. 2014. A System Dynamics Model to Conserve Arid Region Water Resources through Aquifer Storage and Recovery in Conjunction with a Dam. Sirick, Iran, 6: 12. 3957-3959.
12. Rajaian, M.P.M. 2013. Dynamic Systems Simulation with Vensim Software, Ferdowsi University of Mashhad Publications, Second Edition, 212p.
13. Read, L., Madani, K., and Inanloo, B. 2014. Optimality versus stability in water resource allocation, Journal of Environmental Management, 133: 343-354.
14. Sabaghi, M., Shahnazari, A., and Ziai, A.N. 2018. Simulation and Evaluation of Water Evaluation Index of Shahid Yaghoubi Reservoir Dam Using System Dynamics Analysis, Journal of Abkhiz Basin Management, Eighth Year, 16: 200-188.
15. Senge, P.M. 1990. The Fifth Discipline, the Art & Practice of the Learning Organization, New York: Currency Doubleday, New York.
16. Sheikh Khozani, Z., Hosseini, Kh., and Rahimian, M. 2011. Modeling Multipurpose Fuel Operation Using System Dynamics, Journal of Modeling in Engineering, Eighth Year, 21: 67-57.
17. Soltani, M., and Alizadeh, H.A. 2018. Integrated Management of Agricultural Water at the Watershed Scale (IWMsim) with System Dynamics Approach, Journal of Water and Soil Conservation, 7: 2. 69-90.
18. Song, C., Yan, J., Sha, J., He, G., Lin, X., and Ma, Y. 2018. Dynamic Modeling Application for Simulating Optimal Policies on Water Conservation in Zhangjiakou City, China, Journal of Cleaner Production.
19. Stave, K. 2010. Participatory system dynamics modeling for sustainable environmental management: Observations from four cases. Sustainability, 2: 9. 2762-2784.

20. Sun, Y., Liu, N., Shang, J., and Zhang, J. 2016. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model, *Journal of Cleaner Production*, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.110.
21. United Nations-Water. 2005. A gender perspective on water resources and sanitation. Interagency task force on gender and water. In: The 12<sup>th</sup> Session of the Commission on Sustainable Development.
22. United Nations-Water. 2008. Status report on integrated water resources management and water efficiency plans. In: The 16<sup>th</sup> Session of the Commission on Sustainable Development.
23. Ventana Systems, Inc. 2004. Vensim 5 User's Guide, Ventana Systems. Harvard, MA, USA.
24. Wang, X.J., Zhang, J.Y., Liu, J.F., Wang, G.Q., He, R.M., Elmahdi, A., and Elsawah, S. 2011. Water resources planning and management based on system dynamics: A case study of Yulin city. *Environ. Dev. Sustain*, 29: 13. 331-351.
25. Xing, L., Xue, M., and Hu. 2019. Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy- resource- environment system: Case of Wuhan City in China, *Journal of Environmental Management*. 230: 474-487.
26. Zarghami, S.A., Gunawan, I., and Schultmann, F. 2018. System Dynamics Modelling Process in Water Sector: a Review of Research Literature, *Systems research behavioral science*, 35: 6.
27. Zhang, F., Liu, X., Zhang, J., Wu, R., Ma, Q., and Chen, Y. 2017. Ecological vulnerability assessment based on multi-sources data and SD model in Yinma River Basin, China, *Ecological Modelling*, 349: 41-50.
28. Zhang, Y., and Shao, Q. 2018. Uncertainty and its propagation estimation for an integrated water system model: An experiment from water quantity to quality simulations, *Journal of Hydrology*, 565: 623-635.
29. Zomorodian, M., Lai, S.H., Homayounfar, M., Ibrahim, S., Fatemi, S.E., and El-Shafie, A. 2018. The state-of-the-art system dynamics application in integrated water resources modeling, *Journal of Environmental Management*, 227: 294-304.



## Simulation and Dynamics of Hirmand Basin Water Resources System under management scenarios

N. Ali Ahmadi<sup>1</sup>, E. Moradi<sup>\*2</sup>, S.M. Hosseini<sup>2</sup> and A. Sardarshahraki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Dept. of Agricultural Economics, Sistan and Baluchestan University,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Agricultural Economics, Sistan and Baluchestan University

Received: 10.10.2020; Accepted: 02.22.2021

### Abstract

**Background and Objectives:** One of the most important issues for mankind in the present century is access to water resources. Increasing population growth and expanding industry have made agricultural development in arid and semi-arid regions a major challenge. The depletion of water resources and the critical situation in the drinking, agricultural, industrial and environmental sectors are a major problem. An essential principle is the relative balance of water supply and demand that emerges with the creation of a comprehensive water management system.

**Materials and Methods:** The present study was carried out in Hirmand catchment in Sistan area, focusing on the issue of Hirmand river flow and the volume of Chah Nimeh. In order to control the alignment of Chah Nimeh, modeling steps were developed and the basis of the problem was investigated in the process of forming flow-storage diagrams. Using Vensim software, the effect of each variable was simulated on the problem and the calibration and model validation were fitted to different methods such as statistical tests.

**Results:** The results of the tests show that the model corresponds to reality and the model behavior is consistent with the behavior of the system in reality. According to the statistical tests performed, between the observed and simulated values for the well reserves variable, the coefficient of determination is equal to 0.84, the root mean square error (RSME) is equal to 0.25 and the Nash-Sutcliffe criterion is equal to It is 0.77 in 2019. According to the findings, the demand for various agricultural, drinking and environmental needs will increase in the coming years. The total demand in 1410 will increase from 1350.01 to 1515.93 million cubic meters, which will be impossible to meet the needs despite the reduction of system resources. The largest increase in demand will be in the agricultural and drinking sectors.

**Conclusion:** The results show that the irrigation efficiency policies of 70% in the agricultural sector and the reduction of water losses (reduction of evaporation by 50%) based on the proposed scenarios were implemented by the model. Examining the results of these scenarios, it is seen that each of these solutions will reduce water shortage in the coming years, but the best result has been achieved in the first scenario (70% irrigation efficiency in the agricultural sector). In general, the findings show that the continuation of the current consumption trend and, consequently, the continued withdrawal of water resources with the same trend, will have irreparable effects. In this situation, modeling optimal consumption in different sectors, observing limit conditions and creating a culture based on non-extravagance is one of the key issues in crisis management and is one of the most basic foundations of consumption management.

**Keywords:** Modeling and Simulation, System Dynamics, Vensim, Water Resources Management, Watershed

\* Corresponding Author; Email: ebmoradi31@gmail.com

*Arc*