DOI: 10.22059/ijedr.2019.286673.668795

مجله تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران

دوره ۲-۵۱، شماره ۲، ۱۳۹۹ (۲۱۶-۱۹۵)

# A System Dynamics Approach for Evaluating the Impacts of Water Demand Management Policies in Kheirabad River Basin

**Ghasem Layani[1], Mohammad Bakhshoodeh[2]*, Mansour Zibaei[3]**

**1, Ph.D. Student, Agricultural Economics, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran**

**2, Professor of Agricultural Economics, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran**

**3, Professor of Agricultural Economics, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran**

**(Received: Aug. 4, 2019- Accepted: Nov. 3, 2019)**

## ABSTRACT

Kheirabad river basin is part of Zohre-Jarahi basin which is rich in surface water resources. But unprincipled usage of water and soil resources and also increasing water harvesting under climate change reduced the ability of the basin to respond to water demand. Reducing water storage of the Kowsar Dam as a result of reducing surface water inflows, make a concern to meet the future water demand at the basin. Therefore, the management of water resources in this basin is essential. In this study, we used a systemic approach to identify the factor affecting water supply and demand along with feedback and interaction between different elements for studying the behavior of the water resources system over time. The results of the study showed that the available surface water decrease and groundwater balance will be negative. Also, population growth and development of the agricultural sector will lead to an increasing trend in water demand and an increase in the surface and groundwater resources withdraw. Under these circumstances, water scarcity index is increasing and the water system sustainability index is smaller than the unit. The results also revealed that under business as usual (B.a.U) condition, the vulnerability index and maximum deficit of the water system are 0.119 and 0.213, and the reliability and sustainability indices are 0.50 and 0.703, respectively. Therefore, according to the results, the probability of not meeting the increasing demand of water, thus increasing the population and the level of crop cultivation, is predicted by using available water resources during the study period. Therefore, it is necessary to apply demand-side and supply-side management policies in Kheirabad River Basin. Among water demand-side management policies, increasing irrigation efficiency and changing crop pattern, by increasing the sustainability index from 0.703 to 1, are the most efficient policies. Besides, decreasing per capita water consumption plays an important role in increasing the water sustainability index in the basin.

**Keyword:** System Thinking, System Dynamics, Water Management, Sustainability, *Kheirabad river* basin.

**JEL Classification:** Q01, Q50, Q21

## EXTEND ABSTRACT

### Introduction

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 (SD) (Sterman, 2000). Given the growing population and demand for food, as well as the reduction of water supply by precipitation, this paper presents an integrated SD simulation model for exploring the water resource security index in the *Kheirabad river* basin in southwestern Iran. The water stored in *Kowsar* dam (located in *Kheirabad river* basin is in the west of *Gachsaran* County in

* نویسنده مسئول: محمد بخشود

E-mail: Bakhshoodeh@gmail.com

*Kogiluyeh and Boyerahmad* province) has declined in recent years. Because one of the most important goals of the Kowsar dam construction is the supply of drinking water in the southern provinces of Iran and agricultural development in these areas, meeting the growing water demand in this basin is becoming a concern among policymakers. Therefore, there is a crucial need to make an accurate simulation about the water availability to help policymakers adopting appropriate policies as well as achieving sustainable water management.

**System Dynamics Methodology**

System dynamics modeling involves the following steps: (1) articulating the problem and defining system boundary; (2) developing a conceptual model or casual loop diagram (CLD) and a stock and flow diagram of system; (3) Testing model; and (4) analyzing policy options (Sterman, 2000). The first step in SD modeling is to be specific about the dynamic problem and problem articulation (Ford, 1999). Model formulation is representing the structure of the problem and formulating a SD simulation model of the causal theory (Sterman, 2000; Zhuang, 2014). There are several diagram tools to capture the structure of the system, including causal loop diagram (CLD) and stock and flow diagram. Model testing begins as the first equation is written and it is a critical step in SD modeling (Sterman, 2000). Tests to rely on SD model can be divided into two groups, structure tests and behavior tests (Forrester, 1997). Structure tests compare the structure of the SD model with the available knowledge about the real system presented in historical data. Behavior test is to run the model and compare the results to the reference mode (Historical or observed data). When the simulation results match the reference mode, you have reached a major milestone in the modeling process (Ford, 1999).

**Result and Discussion**

The performance of the model is discussed by comparing model outputs for the selected variables to the corresponding historical data. The simulated results follow the same trend as the observed date, indicating that the model is well calibrated. After testing the reliability of the model, the SD model is implemented under different water demand management scenarios. The behavior of the system is simulated over time to assess the availability of water resources and sustainability index. The results showed that during the simulation period, the water availability would be declining. While water demand, which is directly impacted by population growth and agricultural development, is rising. the water sustainability index is 0.703, indicating that the water supply at the basin will likely be unsustainable and total water demand is more than water supply and the maximum deficit index is more than zero in some years. 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.

# کاربرد روش سیستم دینامیک در ارزیابی اثرات سیاست‌های مدیریت تقاضای آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد

**قاسم لیانی[۱]، محمد بخشوده*[۲]، منصور زیبایی[۳]**
۱، دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز. شیراز، ایران
۲، استاد بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز ، شیراز ، ایران
۳، استاد بخش اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز ، ایران
(تاریخ: ۹۸/۵/۱۳- تاریخ تصویب: ۹۸/۸/۱۲)

## چکیده

**حوضه آبریز رودخانه خیرآباد بخشی از حوضه آبریز زهره-جراحی است که از لحاظ آب‌های سطحی از غنای خوبی برخوردار است، ولی با توجه بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب و خاک و همچنین، توسعه روزافزون برداشت از منابع آبی تحت شرایط تغییر اقلیم پتانسیل آبی حوضه جهت تأمین تقاضاهای روزافزون را کاهش داده است. کاهش جریاهای ورودی آب سطحی طی سال‌های اخیر ذخیره آب سد کوثر که تأمین کننده آب شرب استان-های جنوبی است را کاهش داده و این موضوع نگرانی‌هایی را به منظور تأمین تقاضای آب ایجاد کرده است. لذا، مدیریت منابع آب در این حوضه امری ضروری است. در این مطالعه تلاش شد تا در سطح حوضه آبریز با استفاده از یک رویکرد سیستمی در زمینه مدیریت یکپارچه منابع، ضمن شناسایی عوامل مؤثر بر عرضه و تقاضای آب، با در نظر گرفتن روابط متقابل و بازخوردها، رفتار سیستم منابع آب در بلندمدت مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. نتایج مطالعه نشان داد که ادامه وضعیت موجود موجب کاهش حجم آب در دسترس و منفی شدن بیلان آب زیرزمینی می شود. همچنین، رشد جمعیت و توسعه بخش کشاورزی روند افزایشی تقاضای آب و افزایش برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه مورد مطالعه را به دنبال خواهد داشت. تحت این شرایط شاخص کمیابی روندی افزایش داشته و شاخص پایداری سیستم کوچکتر از واحد است. نتایج همچنین نشان داد که با ادامه شرایط فعلی حاکم بر مدل طراحی شده، شاخص آسیب پذیری و شاخص حداکثر کمبود سیستم منابع آب مورد بررسی به ترتیب معادل ۰/۱۱۹ و ۰/۲۱۳ و شاخص‌های قابلیت اطمینان و پایداری نیز به ترتیب معادل ۰/۵۰ و ۰/۷۰۳ خواهد بود. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست آمده در دوره مورد مطالعه احتمال عدم تأمین تقاضای فزاینده آب، درنتیجه افزایش جمعیت و سطح زیرکشت محصولات کشاورزی، با استفاده از منابع آب در دسترس پیش‌بینی می‌شود. لذا، اعمال سیاست‌های مدیریت تقاضا و عرضه آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد ضروری بنظر می‌رسد. در بین سیاست‌های مدیریت تقاضای منابع آب، افزایش راندمان آبیاری و حذف محصولات آب‌بر از الگوی کشت، با افزایش شاخص پایداری سیستم منابع آب حوضه آبریز مورد مطالعه از ۰/۷۰۳ به ۱، بیشترین کارایی را در جهت مدیریت پایدار منابع آب دارا می-باشند. علاوه بر این، کاهش مصرف سرانه آب خانگی نیز نقش مؤثری در افزایش شاخص پایداری سیستم منابع آب دارد.**

**طبقه‌بندی JEL:** Q01, Q50, Q21

**واژه‌های کلیدی:** تفکر سیستمی، سیستم دینامیک، ، مدیریت منابع آب، پایداری، حوضه رودخانه خیرآباد

**مقدمه**

تغییرات در منابع آبی دارای روندی پویا است و عوامل زیادی در طول زمان بر آن اثرگذارند. سیستم مدیریت منابع آب شامل تعامل عوامل مختلف است و عدم قطعیت در روابط خطی و غیرخطی این عوامل، بررسی و ارزیابی مسائل و مشکلات مدیریت منابع آب را پیچیده کرده است (Hassanzadeh *et al.*, 2014). افزایش میزان مصرف و تقاضا، جمعیت، تغییر آب‌وهوا، تغییر در میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی و سطحی همگی عواملی هستند که در طول زمان و به‌صورت مرتبط با یکدیگر بر سیستم آب یک منطقه تأثیر می‌گذارند (Forrester, 1961; Doll, 2002; Fisher *et al.*, 2006; Arnell *et al.*, 2011). همچنین، استفاده‌کنندگان از آب به هم مرتبط بوده و استفاده از آب در یک بخش سایر بخش‌ها را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mirchi, 2013). با توجه به محدودیت منابع آب، افزایش تقاضا و کاهش عرضه این منبع، پیچیدگی‌ها و پویایی‌های بخش آب، تدوین برنامه‌ریزی استراتژیک در جهت مدیریت پایدار منابع آب ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در این شرایط یکی از مهم‌ترین مسایل پیش روی سیاست‌گذاران، مدیریت نظامند و سیستمی منابع آب است (Simonovic and Fahmy, 1999). سیاست‌های مختلف به‌منظور مدیریت منابع آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی اگر تمام ارتباطات بالقوه را در قالب یک سیستم در نظر نگیرد، می‌تواند منجر به نتایج نامطلوب شود (FAO, 2011).

مشکلات موجود در مدیریت منابع آب نسبت به راه‌حل‌های خطی و یک‌سویه مقاوم هستند. یک دیدگاه رویداد گرا[1] از جهان یا تفکر علی خطی برای حل مسایل پیچیده منابع آب کافی نیست (Sterman, 2000; Forrester, 1961). این تفکر مشکلات بسیاری را به وجود خواهد آورد که از آن جمله می‌توان به تفاوت بین آنچه انتظار می‌رود و آنچه به وقوع می‌پیوندد، اشاره کرد. در نتیجه، درک عمیقی از ریشه مشکلات به دست نمی‌آید (Hjorth and Bagheri, 2006). لذا، تصمیم‌گیری و یادگیری اثربخش در دنیای با پیچیدگی فزاینده، نیازمند تفکر سیستمی است. تفکر سیستمی ارایه‌کننده یک درک عمیق‌تر از مشکلات است و کل سیستم و تعاملات بین اجزای سیستم را در نظر می‌گیرد (Senge, 1997). تفکر سیستمی روش‌ها و تکنیک‌هایی را فراهم می‌کند تا با اعمال تفکر علی غیرخطی به برنامه‌ریزی و حل مسایل پیچیده بپردازد. در اصل، تفکر سیستمی از طریق تشکیل زیرسیستم‌ها و لحاظ نمودن اجزای مرتبط، به حل مسایل می‌پردازد. به‌طوری‌که تمامی این اجزا به‌صورت واحد و یک مجموعه کلی در نظر گرفته می‌شوند (Simonovic, 2012). بزرگ‌ترین مزیت تفکر سیستمی کمک به تشخیص تغییرات پر اثر و تغییرات کم اثر در موقعیت‌های پیچیده است. هنر تفکر سیستمی این است که از درون پیچیدگی‌ها ساختارهای بنیادین ایجادکننده دگرگونی‌ها را می‌توان مشاهده نمود.

در تفکر سیستمی، منابع آب به‌عنوان یک سیستم در نظر گرفته می‌شود که از اجزای مختلف تشکیل شده است. با شناسایی و در نظر گرفتن حلقه‌های بازخوردی[2] بین اجزای مختلف، می‌توان یک دید و بینش کلی از سیستم‌های پیچیده را فراهم کرد و در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب قدم مؤثرتری برداشت (Hjorth and Bagheri, 2006; Madani and Marino, 2009; Simonovic, 2012). اگرچه مطالعات بسیاری از مدل‌های یکپارچه، با در نظر گرفتن چرخه هیدرولوژی حوضه، استفاده مختلف از منابع آب در دسترس و تغییرات آب‌وهوا، جهت مدیریت منابع آب در طی سال‌های اخیر استفاده نموده‌اند (Bharati *et al.*, 2008; McCartney *et al.*, 2012; Amisigo *et al.*, 2015; Awotwi *et al.*, 2015)، ولی این مطالعات فرآیندهای بازخوردی و رفتار پویای غیرخطی سیستم آب را در طول زمان در نظر نمی‌گیرند. به‌طورکلی با توجه به پیچیده بودن سیستم منابع آبی، یکی از بهترین ابزارهایی که بتوان از طریق آن ارتباط بین تمامی اجزای داخل یک سیستم پیچیده را بررسی کرد روش سیستم

1 . Event Oriented World View

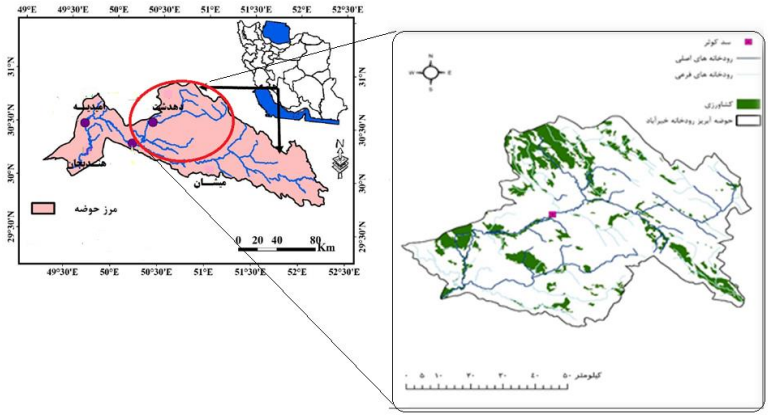
2 . Feedback Loop

دینامیک[1] 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). شاید یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم پویا در نظر گرفتن ساختاری درون‌زا از سیستم مورد مطالعه است تا عکس‌العمل عناصر مختلف سیستم بر یکدیگر و آثار بازخوردی[2] بین آن‌ها را نشان دهد (Simonovic, 2012). مدل‌های ساخته شده بر مبنای رویکرد سیستم دینامیک، ابزارهای قدرتمندی برای درک اثرات متقابل بین زیرسیستم‌های متفاوت و در عین‌حال، مرتبط به‌شمار می‌آیند که مجموع این اثرات متقابل، منشأ بروز رفتارهای پویا در یک سیستم بزرگ‌تر می‌باشند (Ford, 1999; Hjorh and Bagheri, 2006; Meadows *et al.*, 1972; Richmond, 1993; Sterman, 2000). مدل‌های سیستم پویا می‌توانند با شناخت و تعریف رفتارهای مسئله‌دار و محرک‌های اصلی آن‌ها در یک الگوی جامع، مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب را تسهیل نمایند (Madani, 2010).

1 . System Dynamics
2 . Feedback

**حوضه مورد مطالعه**

حوضه آبریز رودخانه خیرآباد بخشی از حوضه آبریز زهره است. متوسط بارندگی سالانه حوضه بسته به ارتفاع از سطح دریا از کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر تا بیشتر از ۸۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و رژیم بارندگی حوضه، مدیترانه‌ای (دارای فصل خشک و مرطوب) می‌باشد. متوسط سالانه دما از ۱۲ سانتی‌گراد در ارتفاعات تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نوسان است. این حوضه آبریز از لحاظ آب‌های سطحی (با توجه به منابع آب سطحی موجود) از غنای خوبی برخوردار است، ولی بهره‌برداری غیراصولی از منابع آب‌وخاک و همچنین، توسعه روزافزون برداشت از منابع آبی، پتانسیل آبی حوضه جهت تأمین تقاضاهای روزافزون را کاهش داده است.




شکل۱- موقعیت محدوده مطالعاتی حوضه آبریز رودخانه خیرآباد

مصارف آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی از دو منبع آب‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. عمده آب سطحی منطقه موردمطالعه توسط سد مخزنی کوثر و آب تأمین‌شده توسط سفره‌های زیرزمینی اغلب توسط چاه‌ها برداشت می‌شود. 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. بررسی آمار و ارقام مربوط در این حوضه نشان می‌دهد که میانگین بارش از ۶۰۰ میلی‌متر در سال ۴۸-۱۳۴۷ به ۴۳۸/۴ میلی‌متر در سال ۹۴-۹۵ رسیده است. نه‌تنها تغییرات اقلیم، جمعیت نیز به‌عنوان عامل مهم تأثیرگذار بر تقاضای آب، به‌طور پیوسته در این حوضه در حال افزایش است. این در حالی است که بر اساس گزارش ارائه شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویر احمد، متوسط مصرف سرانه آب در شهرهای این استان بیش از ۲۲۰ لیتر در شبانه‌روز عنوان شده است که نسبت به میانگین

کشوری در حدود ۲۰ درصد بالاتر است. وقوع خشک‌سالی‌های پیاپی در سال‌های اخیر، کاهش میزان بارندگی، نداشتن الگوی مناسب مصرف و سرانه بالای مصرف آب شرب در شهرهای استان، سبب تشدید تنش آبی و به‌تبع آن کمبود آب و افت فشار آب در شهرهایی همچون یاسوج، مادوان، دیشموک، لنده و باشت شده است.

**روش مدلسازی سیستم دینامیک**

سیستم دینامیک روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی با استفاده از تفکر سیستمی است (Assaraf and Orion, 2005; Forrester, 1994). این روش قابلیت‌های زیادی دارد که شامل: الف) در نظر گرفتن تعاملات بین اجزای مختلف درون یک سیستم و درک اثرات متقابل زیرسیستم‌های متفاوت و در عین حال مرتبط، ب) در نظر گرفتن ساختاری درون‌زا از سیستم، ج) شناسایی تأخیرها و تأثیرات آن بر رفتار سیستم، د) ساخت مدلی نزدیک به دنیای واقعی و شبیه‌سازی ساختار و رفتار سیستم، ه) تحلیل رفتار ایجادشده در سیستم، قابلیت توسعه و انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت استفاده از متغیرهای کمی و کیفی، می‌باشد (Draper, 1993; Forrester, 1994; Frank, 2000; Sterman, 2000). یک فرآیند چهار مرحله‌ای برای مدل‌سازی سیستم دینامیک توسط استرمن (Sterman, 2000) و فورد (Ford, 1999) معرفی شد. این مراحل شامل؛ (۱) تعریف مسئله (ارائه مدل ذهنی)، (۲) فرمول‌بندی (استفاده از نمودار حلقه های علی-معلولی و ذخیره-جریان برای نمایش مدل ذهنی و حلقه‌های بازخوردی)، (۳) ارزیابی و آزمون مدل (شامل آزمون ساختاری و رفتاری)، (۴) استفاده از مدل در تجزیه‌وتحلیل اثرات سناریوهای مختلف است. به منظور آزمون رفتاری مدل طراحی شده آماره‌های میانگین درصد خطای نسبی[1] و ضریب تبیین[2] استفاده می‌شود.

**مدلسازی سیستم منابع آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد**

مدل مفهومی توسعه یافته در این مطالعه برای مسائل مربوط به مدیریت منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد شامل سه زیرسیستم عرضه آب، جمعیت و تولید کشاورزی در نظر گرفته شد. هر زیرسیستم شامل متغیرهای کلیدی و روابط متقابل بین آن‌ها است که درک صحیح رفتار سیستم آب را فراهم می‌آورد. در ادامه هر زیرسیستم به‌طور جداگانه ارایه می‌شود.

**زیرسیستم عرضه آب**

زیرسیستم عرضه آب شامل روابط بازخوردی بین متغیرهای اقلیمی و منابع آب است. این زیرسیستم بر اساس معادله بیلان آب منابع سطحی و زیرزمینی یا به عبارتی با در نظر گرفتن همه ورودی‌ها و خروجی‌ها در سطح منطقه مطالعاتی ساخته می‌شود. این زیرسیستم نمایانگر میزان منابع آب در دسترس در محدوده مورد بررسی است (Kotir *et al.*, 2016). منابع آب‌های سطحی در دسترس از طریق عوامل مختلفی همچون مقدار بارش، رواناب، جریان ورودی و خروجی آب سطحی، تبخیر و تعرق و شرایط زیرساختی کنترل می‌گردد. همان‌گونه که در نمودار (۱) مشاهده می‌شود، بخش عرضه آب در مطالعه حاضر شامل منابع آب‌های سطحی و منابع آب زیرزمینی است. عوامل ورودی شامل جریان‌های ورودی سطحی و زیرسطحی، آب برگشتی و ریزش‌های جوی و عوامل خروجی شامل جریان خروجی سطحی، جریان خروجی زیرسطحی، تبخیر و تعرق، بهره‌برداری و مصارف می‌باشد. دما و بارش به‌عنوان متغیرهای اقلیمی بر میزان آب در دسترس اثر گذاشته به طوری که افزایش بارش می‌تواند میزان منابع آب در دسترس را افزایش دهد. بخشی از حجم بارش مؤثر با در نظر گرفتن ضریب رواناب گزارش شده در مطالعات بیلان آب محدوده‌های مطالعاتی، به‌صورت رواناب به سیستم آب وارد می‌شود (Kotir *et al.*, 2016; Gohari *et al.*, 2017).

همانطور که از رابطه (۱) پیداست حجم رواناب از حاصل‌ضرب ضریب رواناب در حجم بارش حاصل می-شود. براساس رابطه (۲) بخشی دیگر از بارش مؤثر نیز با

---

1 . $MRE = \frac{1}{n}\sum\left(\frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i}\right)\times 100$

2 . $R^2 = 1 - \frac{\sum (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum (X_i - \overline{X}_i)^2}$

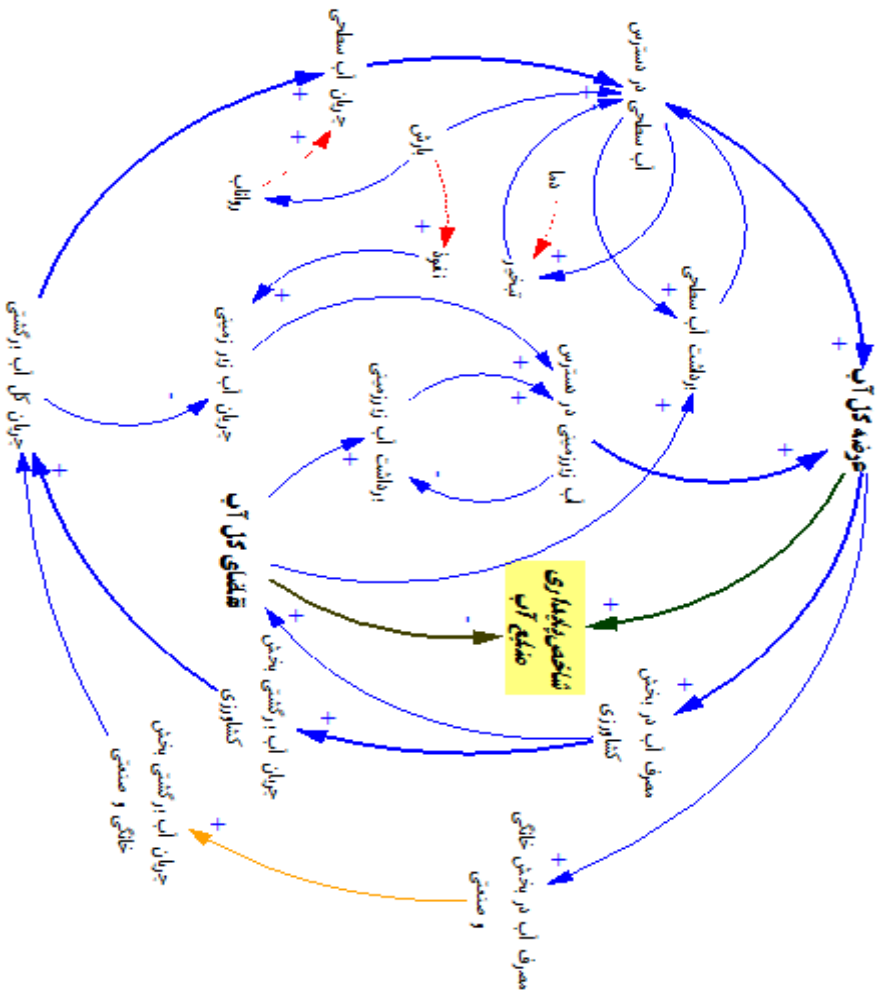
در نظر گرفتن متوسط ضریب نفوذ، به منابع آب زیرزمینی می‌پیوندد:

(۱) حجم بارش در حوضه × ضریب رواناب = حجم رواناب

(۲) حجم بارش در حوضه × ضریب نفوذ = حجم نفوذ

تبخیر و تعرق از جمله متغیرهایی است که می‌تواند بر میزان دسترسی منابع آب اثر قابل‌توجهی داشته باشد. تبخیر و تعرق در این مطالعه تابعی از دما در نظر گرفته شد، لذا افزایش دما در سال‌های آینده، می‌تواند بر تغییر رفتار سیستم منابع آب اثر گذار باشد (اگرچه پارامترهای دیگری همچون سرعت باد و رطوبت نسبی نیز در تعیین نرخ تبخیر اثرگذارند اما با توجه به اطلاعات در دسترس، در این مطالعه نرخ تبخیر تنها تابعی از دما (بصورت تابع لوک آپ) در نظر گرفته شد.). با در نظر گرفتن نرخ تبخیر و تعرق در منطقه مورد بررسی، حجم تبخیر در سال‌های مختلف از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

(۳) حجم تبخیر = حجم آب سطحی در دسترس × نرخ تبخیر




نمودار (۱)- حلقه علی و معلولی زیرسیستم عرضه آب

نرخ تبخیر نیز به‌صورت تابع لوک آپ[1] تابعی از دما در نظر گرفته شد. همچنین، جریان آب برگشتی از بخش‌های مختلف بر اساس رابطه (۴) به مثابه درصدی از آب استفاده شده در هر یک از زیر بخش‌ها است که به منبع آب سطحی و زیرزمینی افزوده می‌شود:

1 .LOOKUP Function

(۴) حجم آب برگشتی =نرخ برگشت آب× تقاضای بخش-های مختلف

مصرف منابع آب در بخش کشاورزی، بخش خانگی و مصرف بخش صنعت و محیط زیست بر اساس رابطه (۵) کل تقاضای آب را تشکیل می‌دهند:

(۵) تقاضای زیست محیطی +تقاضای کشاورزی + تقاضای صنعت + تقاضای شهری= تقاضای کل آب

**زیر سیستم جمعیت**

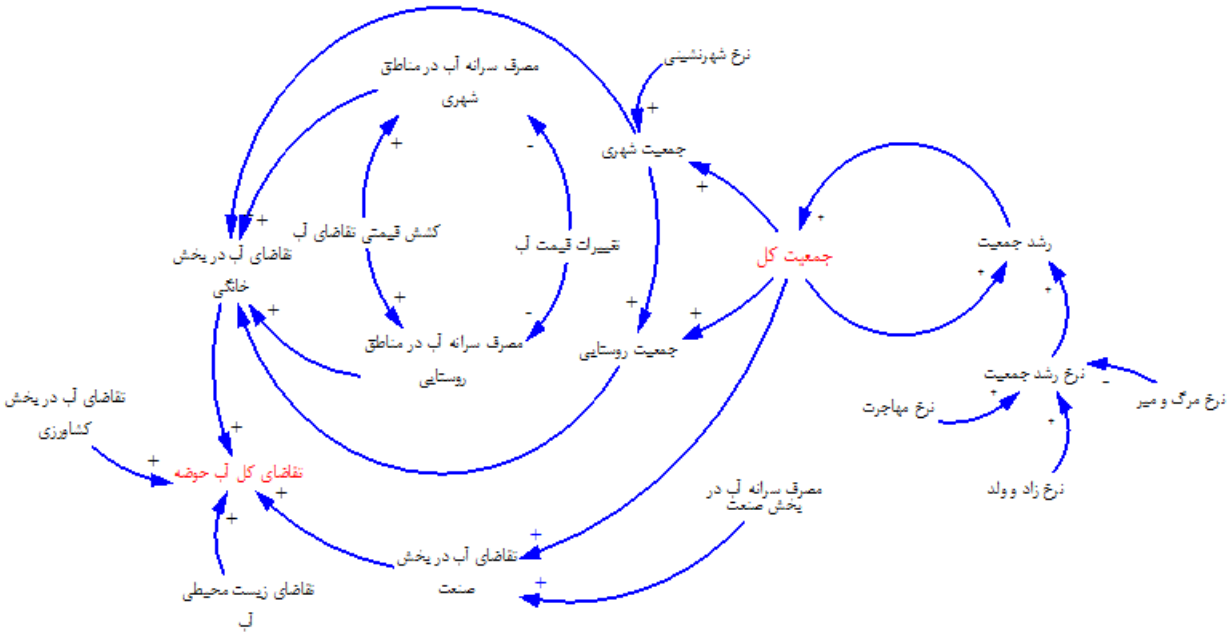
جمعیت یکی از فاکتورهایی است که بر تقاضای آب اثرگذار است (Yang *et al.*, 2015). بر اساس مطالعه یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2015) افزایش جمعیت با توجه به مصرف سرانه، باعث افزایش تقاضای آب می‌شود. به طور مستقیم جمعیت تقاضای خانگی آب را تعیین و به طور غیرمستقیم بر دیگر تقاضاها و استفاده از منابع آب اثرگذار است (Wu *et al.*, 2013).

(۷) جمعیت × مصرف سرانه آب = تقاضای آب بخش خانگی

جمعیت کل در سال t از رابطه (۶) به‌دست می‌آید (Clifford Holmes *et al.*, 2014):

$$p(t) = \int_{t_0}^{t} [B(s) - D(s) + M(s)]ds + p(t_0) \quad (۶)$$

در این رابطه B نرخ زادوولد، D نرخ مرگ‌ومیر و M نرخ مهاجرت است. $p(t_0)$ نیز جمعیت اولیه می‌باشد. پس از محاسبه میزان جمعیت کل، میزان مصرف آب خانگی را می‌توان بر اساس رابطه (۷) از حاصل‌ضرب جمعیت در متوسط مصرف سرانه آب محاسبه نمود. به‌طور کلی، کل میزان آب استخراج شده برای مصرف خانگی تابعی از رشد جمعیت و مصرف سرانه آب است که به‌صورت زیر نوشته می‌شود:




نمودار (۲)- حلقه علی- معلولی زیرسیستم جمعیت

در این مطالعه جمعیت کل بر اساس نرخ شهرنشینی به دو گروه جمعیت شهری و روستایی تقسیم شده است. لذا، میزان تقاضای آب در بخش شهری از حاصل‌ضرب جمعیت شهری در سرانه مصرف آب در بخش شهری و به‌طور مشابه میزان مصرف آب در بخش روستایی از حاصل‌ضرب سرانه مصرف آب در بخش روستایی در جمعیت روستایی به‌دست خواهد آمد. مجموع تقاضای آب در بخش شهری و روستایی تقاضای کل خانگی را ایجاد می‌کند.

تقاضای آب تحت تأثیر تغییرات قیمت است. به‌عبارت دیگر، با توجه به مفاهیم کشش قیمتی تقاضا در اقتصاد خرد، می‌توان عکس‌العمل مصرف‌کنندگان در نتیجه تغییرات قیمت آب را محاسبه نمود. بر این اساس خواهیم داشت:

$$E=\frac{\%\Delta Q}{\%\Delta P}=\frac{Q_t-Q_{t-1}}{P_t-P_{t-1}}\times\frac{P_{t-1}}{Q_{t-1}} \quad (۸)$$

$$Q_t=Q_{t-1}\times(1+E\times\frac{P_t-P_{t-1}}{P_{t-1}})$$

که E کشش قیمتی تقاضای آب، $Q_t$ مقدار تقاضا در دوره t و $p_t$ قیمت آب در در دوره t می‌باشد. انتظار می‌رود با افزایش قیمت هر مترمکعب آب، با فرض ثابت بودن سایر شرایط، مقدار تقاضای آن کاهش یابد (Varian, 2010). بر اساس مطالعه‌ای که در زمینه قیمت تمام شده آب در حوضه سد کوثر انجام شده است مقدار کشش قیمتی تقاضای آب در این مطالعه ۰/۳۵- درصد در نظر گرفته شد ( Regional Water Organization of Kogiluyeh and Boyerahmad province, 2017). از سوی دیگر، تقاضای آب در صنعت بر اساس رابطه (۹) تابعی از میزان جمعیت و سرانه مصرف آب برای صنعت تعریف‌شده است. به‌عبارت‌دیگر، سرانه مصرف آب برای بخش صنعت از طریق تقسیم میزان آب مصرفی این بخش بر جمعیت در طی سال‌های مختلف قابل‌محاسبه است (Balali and Viaggi, 2015).

(۹) تقاضای آب بخش صنعت = سرانه مصرف آب در بخش صنعت × جمعیت

**زیر سیستم تولید کشاورزی**

بخش کشاورزی مصرف‌کننده عمده منابع آب است و صرف‌نظر از تأثیرپذیری که از تغییر در وضعیت هیدرولوژی رودخانه‌ها و تغییرات منابع آب دارد، به طور مستقیم نیز فعالیت‌های آن تحت تأثیر پارامترهای آب‌وهوا قرار دارد. تغییرات آب‌وهوا بر میزان نیاز آبی محصولات و در نتیجه آب مصرفی و عملکرد محصول اثر خواهد گذاشت. تغییر در عملکرد محصولات کشاورزی، میزان تولید این بخش و درآمد تولید کنندگان را دستخوش تغییر خواهد کرد. زیرسیستم کشاورزی تعریف‌شده در مطالعه حاضر شامل ۹ دسته محصول زراعی آبی از قبیل گندم، جو، برنج، ذرت، کلزا، لوبیا، گوجه، هندوانه و خیار می‌باشد.

افزایش سطح زیر کشت میزان مصرف آب در بخش کشاورزی را افزایش داده که خود بر تقاضای کل و محدودیت منابع آبی اثرگذار است. به‌طورکلی، تقاضای آب بخش کشاورزی از رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

(۱۰) تقاضای آب بخش کشاورزی= (∑سطح زیرکشت×نیاز خالص آبی گیاه / راندمان آبیاری) متوسط

براساس اطلاعات موجود از منطقه متوسط راندمان آبیاری در حوضه مورد بررسی ۴۵ درصد در نظر گرفته شد. برای هر محصول سطح زیر کشت مورد انتظار و نیاز خالص آب آبیاری هر دو دارای رابطه مثبت با نیاز کل آبی آن محصول می‌باشند. تقاضای آب مورد انتظار بخش کشاورزی حوضه که از مجموع تقاضای محاسبه شده برای تمام محصولات به دست می‌آید، نیاز خالص کشاورزی را تعیین می‌کند. علاوه بر این، نیاز آب کشاورزی رابطه علی-معلولی منفی با راندمان آبیاری دارد. اگر مصرف آب در بخش کشاورزی با راندمان بالای آبیاری همراه شود موجب به حداقل رساندن هدر رفت آب و افزایش مصرف خالص آب کشاورزی می‌شود.

در زیرسیستم کشاورزی میزان تولید هر محصول براساس رابطه (۱۱) از طریق حاصل‌ضرب عملکرد در سطح زیرکشت آن محصول محاسبه می‌شود.

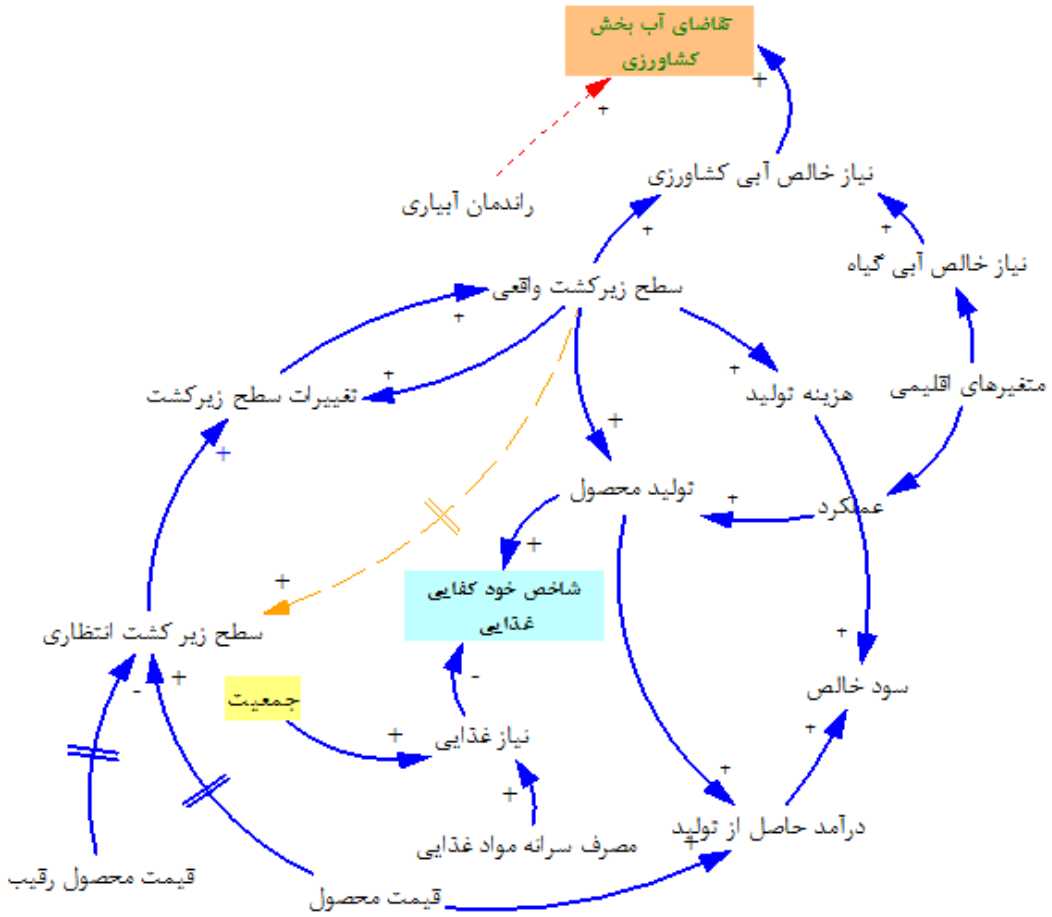
(۱۱) میزان تولید = سطح زیرکشت محصول × عملکرد

افزایش جمعیت با توجه به میزان مصرف سرانه موادغذایی منجر به افزایش تقاضا برای مواد غذایی می‌گردد (Atherton, 2013).

(۱۲) تقاضا برای مواد غذایی = جمعیت × مصرف سرانه مواد غذایی

در این رابطه، میزان جمعیت بر اساس خروجی زیرسیستم جمعیت در مطالعه حاضر تعیین می‌شود. همچنین، مصرف سرانه مواد غذایی نیز به‌طور متوسط برای هر محصول بر اساس گزارش‌های مرکز آمار در نظر گرفته شده است. بر اساس مطالعه *آترتون* ( Atherton, 2013) شاخص خودکفایی غذایی به صورت نسبت میزان تولید محصولات غذایی به مجموع تقاضای برای مواد غذایی در مدل تعریف شده است.

نمودار (۳)، حلقه علی-معلولی زیرسیستم کشاورزی را نشان می‌دهد:




نمودار (۳)- حلقه علی-معلولی زیرسیستم کشاورزی

در این تحقیق، از الگوی تعدیل جزئی نرلاو[1] (۱۹۵۶) جهت مدل‌سازی سطح زیر کشت محصولات زراعی استفاده شده است. این الگو بر این فرض استوار است که کشاورزان سطح زیر کشت مطلوب خود را بر اساس قیمت مورد انتظار تعیین می‌کنند.

$$Y_t = \gamma\beta_0 + \gamma\beta_1 P_{t-1} + (1-\gamma)Y_{t-1} + \gamma U_t \qquad (۱۳)$$

در این مطالعه، قیمت هر محصول نیز برای دوره مورد مطالعه بر اساس مدل ARIMA پیش‌بینی و به‌عنوان یک متغیر برون‌زا وارد مدل سیستم پویای طراحی شده برای حوضه مورد بررسی شده است.

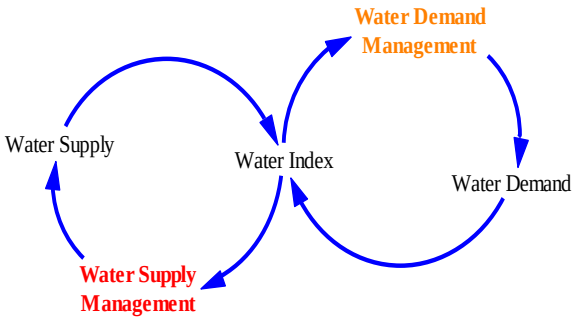
همانطور که مشاهده می‌شود متغیر وابسته با یک وقفه به‌عنوان متغیر توضیحی در سمت راست معادله (۱۳) لحاظ شده است. با توجه به درونزا بودن این متغیر، به منظور برآورد مدل از روش گشتاورهای تعمیم‌یافته[2] (GMM) بهره گرفته شد.

### شاخص‌های منابع آب

ارتباط متقابل بین عرضه و تقاضای آب با استفاده از شاخص تعادل عرضه و تقاضا قابل ارائه است (Langedale *et al.*, 2007).

1 .Nerlove

2 .Generalized Method of Moments (GMM)




نمودار (۴)- ارتباط متقابل بین عرضه و تقاضای آب

در مطالعات مختلف شاخص‌های مختلفی برای لحاظ اثرات متقابل بین دو بخش در مدل‌سازی استفاده شده است. به‌طور مثال در مطالعه *ژانگ* (Zhung, 2014) شاخص تعادل بین عرضه و تقاضای آب به‌صورت زیر معرفی شد:

$$BI = WS - WD \qquad (۱۴)$$

جایی‌که BI شاخص تعادل، SW دسترسی به منابع آب و WD تقاضای قابل‌انتظار در محدوده مورد مطالعه است. با افزایش (کاهش) منابع آب در دسترس شاخص تعادل آب افزایش (کاهش) می‌یابد. زمانی که شاخص تعادل آب نزولی و یا حتی پایین‌تر از صفر است، نشان می‌دهد که نیازمند گزینه‌های مدیریت عرضه و یا تقاضاست. سیاست‌های مدیریت تقاضا با کاهش تقاضای آب می‌تواند منجر به افزاش شاخص تعادل آب شود. گزینه‌های عرضه محور نیز، منابع آب در دسترس را از طریق انتقال آب از حوضه‌های دیگر، تصفیه آب و مواردی دیگر افزایش داده . درنهایت تعادل سیستم آب را افزایش می‌دهد (Zhung, 2014).

در این مطالعه، از شاخص پایداری منابع آب به منظور لحاظ نمودن اثرات متقابل بین بخش تقاضا و عرضه آب و ارزیابی و مقایسه آثار سیاست‌های مختلف از منظر پایداری استفاده شده است. شاخص پایداری معیاری جهت اندازه‌گیری ظرفیت انطباق یک سیستم برای کاهش آسیب‌پذیری است ( Loucks, 1997; Langsdale *et al.*, 2007). شاخص پایداری و شاخص کمیابی به‌منظور ارزیابی سیاست‌های مختلف به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$WSI = \frac{WD}{WS} \qquad (۱۵)$$

$$SI = [REI \times (1-VUL) * (1-MAX\ DEF)]^{1/3} \qquad (۱۶)$$

در رابطه بالا SI شاخص پایداری، REI شاخص قابلیت اطمینان، VUL شاخص آسیب پذیری و MAX DEF شاخص کمبود حداکثر است. شاخص قابلیت اطمینان بصورت احتمال تأمین تقاضای آب در دوره مورد مطالعه با استفاده از منابع آب در دسترس تعریف می‌شود ( Klemes *et al.*, 1981; Hashimoto *et al.*, 1982). این شاخص توانایی سیستم را در پاسخگویی به تقاضا در دراز مدت نشان می‌دهد. این شاخص از تقسیم تعداد سال‌هایی که کمبود آب وجود ندارد (D=0) بر دوره شبیه سازی به‌دست می‌آید ( McMahon *et al.*, 2006):

$$REI = \frac{number of\ time\ D=0}{N} \qquad (۱۷)$$

$$D = \begin{cases} WD - WS & if \quad WD > WS \\ 0 & otherwise \end{cases} \qquad (۱۸)$$

شاخص آسیب پذیری احتمال عدم توانایی سیستم در پاسخگویی به تقاضا را نشان می‌دهد ( Hashimoto *et al.*, 1982). شاخص آسیب پذیری از تقسیم میانگین سالانه کمبود بر میانگین سالانه تقاضای در دوره کمبود تعریف می‌شود ( Sandoval-Solis *et al.*, 2011, Gohari *et al.*, 2017):

$$VUL = \frac{(\sum D)/number of\ times\ D>0 occurred}{Water\ Demand} \qquad (۱۹)$$

شاخص کمبود حداکثر نشان دهنده حداکثر کمبود در هر سال است. این شاخص بصورت یک شاخص بی بعد از تقسیم حداکثر کمبود سالانه بر متوسط تقاضای سالانه محاسبه می‌شود (Moy *et al.*, 1986):

$$Max\ Def = \frac{\max(D_{Annual})}{water\ demand} \qquad (۲۰)$$

**سیاست‌های مدیریتی اتخاذ شده**

به‌منظور بهبود عملکرد سیستم منابع آب در درازمدت و افزایش توانایی سیستم در پاسخگویی تقاضای فزآینده آب در حوضه مورد مطالعه لازم است سیاست‌هایی اتخاذ شود. بنابراین، در این بخش از مطالعه تعدادی از سیاست‌های مدیریت تقاضا آب تعریف و با استفاده از مدل طراحی شده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

جدول (۱). سیاست‌های مدیریت تقاضای آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد

| | |
|---|---|
| بهبود راندمان | افزایش راندمان آبیاری به‌عنوان یکی از سیاست‌های مؤثر در حفاظت منابع آب، با در نظر گرفتن پتانسیل راندمان، فاصله وضع موجود تا پتانسیل و رشد پیش بینی شده در قانون برنامه‌های توسعه، به‌صورت افزایش راندمان آبیاری تا ۷۰ درصد تعریف شده است. |
| تغییر الگوی کشت | با توجه به کاهش منابع آب دردسترس، جلوگیری از کاشت محصولات با مصرف و نیاز آب بالا به‌ویژه برنج و هندوانه در دستور کار سازمان جهاد کشاورزی قرار گرفت. لذا در این مطالعه کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی از طریق حذف دو محصول برنج و هندوانه به عنوان سیاست مدیریت تقاضای آب بخش کشاورزی مد نظر قرار گرفت. |
| کاهش نیاز آبی | به عنوان سیاستی در جهت مدیریت تقاضای آب کشاورزی کاهش ۱۰ درصد از نیاز آبی محصولات کشاورزی در مدل اجرا شده است. کاهش نیاز آبی محصولات کشاورزی از طریق تغییر استراتژی‌های آبیاری، خاکورزی حفاظتی، تغییر تاریخ کشت و استفاده از واریته‌های مقاوم به خشکی قابل دستیابی است. |
| کنترل مصرف سرانه | این سیاست کاهش ۲۰ درصدی سرانه آب مصرفی در بخش خانگی (شهری و روستایی) را پیگیری می‌نماید. |
| اصلاح تعرفه آب شرب | مطابق با برنامه توسعه اقتصادی به جهت ارتقای عدالت اجتماعی و افزایش بهره وری آب، سیاست اصلاح تعرفه آب شرب (افزایش سالانه ۷ درصدی) در نظر گرفته شد. |
| کنترل برداشت از منابع | در این سیاست فرض شد تنها ۷۰ درصد از مقدار تقاضای آب بخش خانگی بدست آمده از مدل از منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه تأمین خواهد شد و ۳۰ درصد آن از طریق انتقال بین حوضه‌ای و یا شیرین کردن آب پاسخ داده می‌شود. |

در این مطالعه، به منظور مدلسازی سیستم منابع آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد از نرم‌فزار ونسیم (Vensim DSS) استفاده شده است. نرم‌افزار ونسیم در واقع یک زبان شبیه‌سازی است که توسط Ventana Sytems در دانشگاه هاروارد ماساچوست در سال ۱۹۸۵ طراحی شد. نرم‌افزار ونسیم از سری نرم‌افزارهای مناسب برای ارزیابی دینامیکی سیستم‌ها می‌باشد. این نرم‌افزار با حل تکراری معادلات دیفرانسیل موجود در سیستم به روش تفاضل‌های محدود، رفتار سیستم را در دوره موردنظر شبیه‌سازی نشان می‌دهد. به‌طوری‌که بعد از اجرای مدل، رفتار تک تک متغیرهای موجود طی نمودارها و جداولی قابل ملاحظه خواهد بود. به‌منظور برآورد ضرایب الگوی تعدیل جزیی نرلاو نیز از نرم‌افزار Eviews9 استفاده شد.

## نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج مدل نرلاو جهت پیش‌بینی سطح زیر کشت محصولات کشاورزی به‌عنوان ورودی سیستم دینامیک طراحی‌شده برای حوضه آبریز رودخانه خیرآباد ارائه می‌شود. در ادامه نتایج آزمون مدل طراحی‌شده، ارایه می‌شود. سپس، از مدل طراحی شده برای شبیه‌سازی رفتار سیستم منابع آب استفاده شد و شاخص‌های منابع آب نیز محاسبه گردید. در نهایت، اثر سیاست‌های مدیریت تقاضای تعریف شده در قسمت قبل مورد ارزیابی قرار گرفت.

**نتایج برآورد الگوی تعدیل جزئی نرلاو**

در جدول (۲) نتایج برآورد ضرایب مدل نرلاو برای محصولات کشاورزی گزارش شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقادیر $R^2$ و J-Statistic بیانگر خوبی برازش مدل و انتخاب متغیرهای ابزاری مناسب جهت برآورد مدل است.

ضرایب برآوردی الگوی تعدیل جزئی نرلاو به عنوان پارامترهای ورودی زیرسیستم کشاورزی، وارد نرم‌افزار Vensim DSS شدند. بر اساس مبانی نظری عرضه، فرض شده است که کشاورزان در هر سال میزان سطح زیرکشت خود را به‌صورت درصدی از تفاوت بین سطح زیر کشت (تولید) با وقفه و سطح زیر کشت (تولید) مطلوب به‌صورت جزیی تعدیل می‌کنند. ضریب تعدیل

جزیی (۷) برای تمامی محصولات مطابق با انتظار بین صفر و یک است. این ضریب نشان می‌دهد که هر سال چه میزان از شکاف بین سطح زیر کشت مطلوب و واقعی کاهش می‌یابد. سطح زیر کشت اکثر محصولات در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر سیاست‌های قیمتی است. به‌عبارت‌دیگر، کشاورزان تمایل دارند با افزایش قیمت محصولات کشاورزی، با فرض ثابت بودن سایر شرایط، سطح زیر کشت آن را افزایش دهند. همچنین سیاست‌های قیمتی در بازار محصولات رقیب نیز می‌تواند تأثیر منفی بر تصمیم کشاورزان در تعیین سطح زیر کشت محصولات داشته باشد. البته برای محصولاتی نظیر لوبیا به دلیل حساسیت بسیار پایین سطح زیر کشت نسبت به تغییرات قیمت، از طریق افزایش قیمت نمی‌توان انتظار افزایش قابل‌توجهی در سطح زیر کشت این محصول را داشت. یکی از مهم‌ترین دلایل حساسیت پایین زارعین نسبت به تغییرات قیمت، می‌تواند نوسانات زیاد قیمت در بازار این محصول باشد.

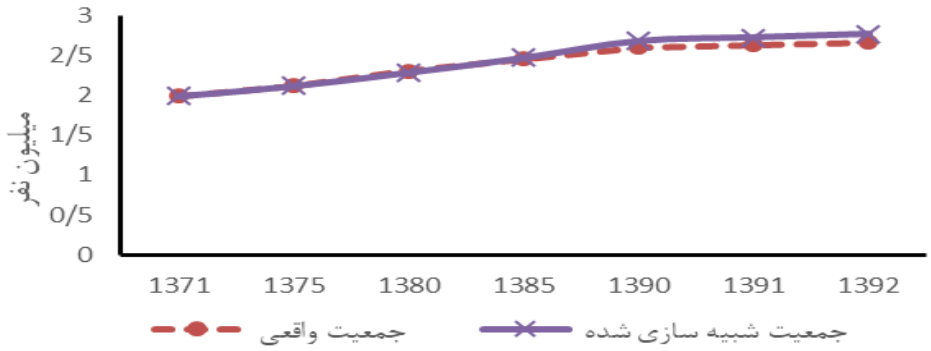
جدول (۲)- نتایج الگوی تعدیل جزئی نرلاو محصولات منتخب

| محصول | عرض از مبدأ | وقفه سطح زیرکشت | وقفه قیمت | وقفه قیمت رقیب | $R^2$ | J-Statistic (prob) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| گندم | ۴۰۰۳/۵***(۲/۹۵) | ۰/۷۳***(۳/۲۲) | ۱۹۳/۸**(۲/۵۴) | -۲۷۱/۹*** (-۴/۴) | ۰/۹۱ | ۱/۲۲ (۰/۲۶) |
| جو | ۵۱۹/۹*(۱/۸۱) | ۰/۶۴*(۱/۸۶) | ۰/۵۳ (۰/۸۹) | -۲/۴۷ (-۰/۳۷) | ۰/۵۲ | ۱/۳۸ (۰/۸۴) |
| برنج | ۶۷۷/۷*(۱/۹۵) | ۰/۶۱***(۴/۰۵) | ۰/۳۳ (۰/۳۴) | ۸/۶۲**(۲/۴۹) | ۰/۸۱ | ۲/۱۶ (۰/۵۳) |
| ذرت | ۲۳۵/۲***(۳/۵۵) | ۰/۸۸***(۷۹/۱۱) | ۴/۹۶**(۲/۸۴) | -۰/۴۹***(-۳/۴۹) | ۰/۹۹ | ۴/۶۹ (۰/۴۵) |
| لوبیا | ۵۸/۳۶***(۶/۴۰) | ۰/۶۸***(۱۴/۳۹) | ۰/۰۵***(۶/۹۹) | -۰/۰۸***(-۹/۲۵) | ۰/۹۸ | ۱/۶۵ (۰/۴۳) |
| کلزا | ۲۲۷/۳***(۳/۵۵) | ۰/۶۷***(۶/۳۰) | -۰/۰۱ (-۰/۰۴) | -۲/۷۸**(-۲/۰۲) | ۰/۶۰ | ۳/۸۸ (۰/۷۹) |
| خیار | ۱۲۲/۹**(۲/۷۸) | ۰/۷۴***(۵/۲۸) | ۰/۰۰۶ (۰/۰۰۷) | -۴/۲۶***(-۳/۳۲) | ۰/۷۲ | ۰/۴۰ (۰/۵۲) |
| گوجه | ۳۵/۴۵***(۵/۶۴) | ۰/۷۲***(۱۱/۳۰) | ۰/۰۱۵ (۰/۵۸) | -۰/۱۳**(-۲/۴۶) | ۰/۹۶ | ۶/۷۶ (۰/۱۴) |
| هندوانه | ۳۹۱/۵ *(۱/۷۹) | ۰/۶۹***(۵/۴۶) | -۹/۲۲ *(-۱/۹۲) | ۱/۹۳ (۰/۵۳) | ۰/۶۲ | ۴/۴۰ (۰/۲۲) |

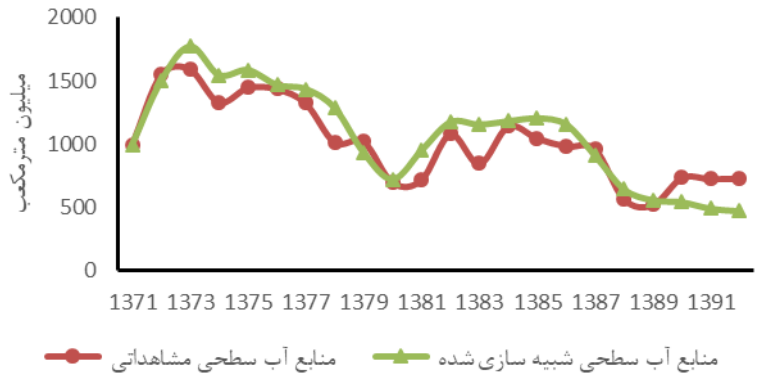
ماخذ: یافته‌های مطالعه (اعداد داخل پرانتز آماره تی و *، ** و *** به ترتیب سطح معنی داری ۱۰، ۵ و ۱ درصد)- اعداد داخل پرانتز برای آماره J-Statistic سطح احتمال است.

**نتایج آزمون مدل سیستم دینامیک طراحی شده**

قبل از استفاده از مدل برای ارزیابی گزینه‌های سیاست‌گذاری، باید نسبت به عملکرد صحیح مدل اطمینان حاصل کرد و چنانچه خروجی مدل برای متغیرهای کلیدی مشابه با روند مشاهده‌شده آن‌ها در دنیای واقعی باشد، می‌توان امیدوار بود که مدل شامل عنصرها و مکانیزم‌های کلیدی در ایجاد رفتار موردنظر است. نمودارهای (۵) و (۶) مقایسه مقادیر مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده متغیرهای جمعیت و منابع آب سطحی را در آزمون رفتاری نشان می‌دهد.




نمودار (۵)- مقایسه جمعیت شبیه سازی شده با جمعیت واقعی در حوضه رودخانه خیرآباد




نمودار (۶)- مقایسه حجم آب سطحی شبیه سازی شده با حجم آب سطحی واقعی در حوضه رودخانه خیرآباد

در نگاهی اجمالی همبستگی میان روندهای مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده این متغیرها برای یک مدل یکپارچه پیچیده قابل‌قبول است و این همبستگی نشان می‌دهد که مدل به‌منظور بازسازی رفتار پارامترهای مختلف در درون سیستم به‌خوبی واسنجی شده است. نتایج محاسبه ضریب تعیین ($R^2$) برای متغیرهای موردنظر نیز نشان می‌دهد که برای متغیر جمعیت ضریب تعیین معادل ۰/۹۹ و برای متغیر حجم آب سطحی در دسترس، معادل ۰/۷۲ است که تأییدی بر توانایی خوب مدل طراحی‌شده در بازسازی رفتار متغیرهای کلیدی سیستم است. همچنین میانگین درصد خطای نسبی نیز برای این دو متغیر به ترتیب معادل ۰/۸۶ درصد و ۴/۴۵ درصد محاسبه شده است. بنابراین از سیستم موردنظر می‌توان جهت شبیه‌سازی رفتار سیستم منابع آب در سال‌های آینده استفاده کرد.

**مطالعه رفتار متغیرهای کلیدی سیستم منابع آب**

براساس ضرایب بدست آمده از الگوی تعدیل جزئی نرلاو مقادیر شبیه سازی شده سطح زیرکشت محصولات منتخب در حوضه آبریز مورد مطالعه در جدول (۳) نشان داده شد. بطور متوسط نرخ تغییر سالانه سطح زیرکشت محصولات کشاورزی معادل ۰/۸۵ درصد بدست آمده است.

جدول (۳)- نتایج شبیه سازی سطح زیرکشت (هزارهکتار) و تقاضای آب در بخش کشاورزی (میلیون مترمکعب)

| سال | ۱۳۹۸ | ۱۴۰۰ | ۱۴۰۲ | ۱۴۰۴ | ۱۴۰۶ | ۱۴۰۸ | ۱۴۱۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سطح زیرکشت | ۱۹/۲۳ | ۲۰/۰۷ | ۲۰/۸۰ | ۲۰/۷۱ | ۲۰/۱۶ | ۲۰/۲۶ | ۲۱/۰۵ |
| حجم تقاضای آب بخش کشاورزی | ۲۹۸/۴۶ | ۳۰۶/۴۳ | ۳۱۳/۵۶ | ۳۱۳/۱۵ | ۳۰۸/۲۴ | ۳۰۹/۳۲ | ۳۱۶/۷۴ |

ماخذ: یافته‌های مطالعه

به‌طور جزئی‌تر نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که مجموع سطح زیرکشت محصولات زراعی منتخب در ابتدای دوره شبیه‌سازی معادل ۱۹/۲۳ هزار هکتار و در انتهای دوره شبیه‌سازی معادل ۲۱/۰۵ هزار هکتار خواهد بود. انتظار می‌رود با افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی، با توجه به نیاز خالص آبی این محصولات، تقاضای آب و مقدار برداشت از منابع افزایش و در نتیجه، توانایی سیستم منابع آب در پاسخگویی به تقاضای فزآینده در آینده کاهش یابد. مطابق با انتظار حجم تقاضای آب در بخش کشاورزی در ابتدای دوره شبیه سازی معادل ۲۹۸/۴۶ میلیون مترمکعب و در انتهای دوره شبیه سازی با افزایش سطح زیرکشت محصولات کشاورزی در حوضه مورد بررسی معادل ۳۱۶/۷۴ میلیون مترمکعب خواهد بود.

جمعیت شبیه‌سازی شده در حوضه آبریز مورد مطالعه در جدول (۴) گزارش شده است. نرخ رشد سالانه جمعیت در مطالعه حاضر معادل ۱/۵۹ درصد است که در طول دوره ۱۴۱۰-۱۳۹۸ ثابت فرض شده است. با این نرخ رشد، میزان جمعیت در سال ۱۳۹۸ معادل ۳/۰۴ میلیون نفر و در سال ۱۴۱۰ معادل ۳/۶۷ میلیون نفر برآورد شده است. از این بین در ابتدای دوره معادل ۲/۰۳ میلیون نفر ساکن مناطق شهری و ۱/۰۱ میلیون نفر ساکن مناطق روستایی هستند. در سال ۱۴۱۰ نیز جمعیت ساکن مناطق شهری و روستایی به ترتیب معادل ۲/۴ میلیون نفر و ۱/۲ میلیون نفر است. تقاضای آب خانگی تحت تأثیر مصرف سرانه آب در بخش شهری و روستایی و جمعیت است. با توجه به روند رو به رشد جمعیت در منطقه مورد مطالعه انتظار می‌رود تقاضای آب برای بخش شهری و روستایی افزایش یابد. همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود تقاضای آب خانگی مطابق با انتظار دارای روندی افزایشی است. به‌طوری‌که مقدار این متغیر در ابتدای دوره شبیه‌سازی شده معادل ۱۶۷/۹۸ میلیون مترمکعب و در انتهای دوره با رشدی معادل ۲۰/۸ درصد به ۲۰۲/۹۹ میلیون مترمکعب می‌رسد. بر اساس نتایج به‌دست آمده میانگین سالانه حجم آب تقاضا شده در بخش خانگی معادل ۱۸۴/۹۸ میلیون مترمکعب است که ازاین‌بین ۲۲ درصد آن (معادل ۴۰/۵۰ میلیون مترمکعب) مربوط به بخش روستایی و ۷۸ درصد آن (معادل ۱۴۱/۴۸ میلیون مترمکعب) مربوط به خانوارهای شهری است. تغییرات تقاضای آب برای بخش صنعت نیز به نوعی تابعی از جمعیت تعریف شده است. بنابراین روند مشاهده‌شده برای این متغیر نیز همچون روند تغییرات تقاضای آب خانگی افزایشی است.

جدول (۴)- نتایج شبیه سازی جمعیت (میلیون نفر) و تقاضای آب در بخش خانگی و صنعتی (میلیون مترمکعب)

| سال | ۱۳۹۸ | ۱۴۰۰ | ۱۴۰۲ | ۱۴۰۴ | ۱۴۰۶ | ۱۴۰۸ | ۱۴۱۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| جمعیت | ۳/۰۴ | ۳/۱۴ | ۳/۲۵ | ۳/۳۴ | ۳/۴۵ | ۳/۵۶ | ۳/۶۷ |
| حجم تقاضای آب بخش خانگی | ۱۶۷/۹۸ | ۱۷۳/۳۷ | ۱۷۸/۹۲ | ۱۸۴/۶۶ | ۱۹۰/۵۸ | ۱۹۶/۶۸ | ۲۰۲/۹۹ |
| حجم تقاضای آب بخش صنعتی | ۳۷/۴۷ | ۳۷/۶۵ | ۳۷/۸۲ | ۳۷/۹۷ | ۳۸/۱۱ | ۳۸/۲۴ | ۳۸/۳۶ |
| تقاضای کل آب * | ۵۸۲/۹۲ | ۵۹۶/۴۵ | ۶۰۹/۳۰ | ۶۱۴/۷۹ | ۶۱۵/۹۳ | ۶۲۳/۲۵ | ۶۳۷/۱۰ |

ماخذ: یافته‌های مطالعه (*تقاضای کل مجموع تقاضای آب در بخش‌های کشاورزی، صنعت، خانگی و محیط زیست است).

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که حجم آب سطحی در دسترس در طول دوره شبیه سازی دارای روند کاهشی است و بیشترین میزان خود را در ابتدای دوره یعنی ۴۹۹/۰۳ میلیون مترمکعب تجربه می‌کند. در انتهای دوره مورد مطالعه ذخیره حجم آب سطحی معادل ۴۳۳/۸۹ میلیون مترمکعب پیش‌بینی‌شده است. انتظار می‌رود سیستم منابع آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد کمترین میزان حجم آب سطحی در دسترس را در انتهای دوره شبیه سازی تجربه نماید. میانگین تغییرات سالانه این متغیر در طول دوره مورد مطالعه ۱/۲۳- درصد برآورد شده است. با ادامه شرایط فعلی حاکم بر سیستم منابع آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد، با افزایش تقاضا آب در بخش خانگی در نتیجه رشد جمعیت و افزایش تقاضا در بخش کشاورزی درنتیجه تغییرات مثبت سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، حجم برداشت از منابع افزایش و در نتیجه ذخیره آب سطحی کاهش می‌یابد. با توجه به سیر نزولی حجم آب سطحی در طول دوره شبیه‌سازی می‌توان بیان نمود که سیستم منابع آب در آینده‌ای نزدیک با کمبود فیزیکی آب مواجه خواهد شد. این بدان معناست که حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری در مصرف آب ممکن است آب کافی برای تأمین نیازها در اختیار نباشد. این نکته ضرورت اتخاذ استراتژی‌های مدیریت تقاضا و یا عرضه آب را گوشزد می‌کند.

روند تغییر در برداشت از منابع آب سطحی در جدول (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است برداشت از منابع آب سطحی در طول دوره موردمطالعه دارای روند افزایشی است و بیشترین میزان خود را در سال ۱۴۱۰ (۳۲۴/۱۷ میلیون مترمکعب) تجربه می‌کند. میانگین تغییر سالانه برداشت از این

منبع معادل ۰/۷۵ درصد بدست آمده است. متغیر حجم آب برداشتی از منابع آب سطحی تحت تأثیر متغیرهای تقاضای بخش خانگی، صنعتی و کشاورزی است. البته برداشت آب برای مصارف زیست‌محیطی بر اساس گزارش سازمان آب منطقه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد مقدار ثابتی (معادل ۷۹ میلیون مترمکعب در سال) در نظر گرفته شد. با افزایش رشد جمعیت (با در نظر گرفتن نرخ رشد ۱/۵۹ درصد) به‌طور مستقیم تقاضا برای مصارف خانگی و صنعتی افزایش می‌یابد و درنهایت، برداشت از منابع آب سطحی تغییر می‌کند. وجود نوسان در روند برداشت از منابع آب سطحی را می‌توان به تغییرات سطح زیر کشت در طول دوره موردمطالعه نسبت داد.

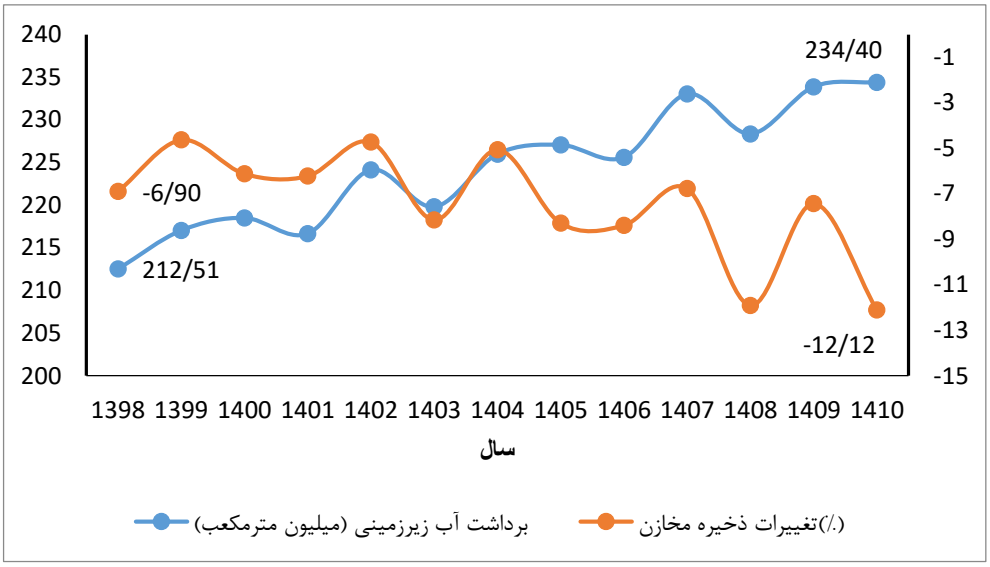
جدول (۵)- نتایج شبیه سازی حجم آب سطحی دردسترس و میزان برداشت از منابع – میلیون مترمکعب

| سال | ۱۳۹۸ | ۱۴۰۰ | ۱۴۰۲ | ۱۴۰۴ | ۱۴۰۶ | ۱۴۰۸ | ۱۴۱۰ | درصد تغییر سالانه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| حجم آب سطحی در دسترس | ۴۹۹/۰۳ | ۴۸۷/۷۰ | ۴۷۸/۵۴ | ۴۶۷/۷۷ | ۴۵۵/۰۸ | ۴۴۳/۳۱ | ۴۳۳/۸۹ | **-۱/۲۳** |
| حجم برداشت از منابع سطحی | ۲۹۱/۴۲ | ۲۹۸/۹۸ | ۳۰۶/۲۵ | ۳۰۹/۹۵ | ۳۱۱/۵۷ | ۳۱۶/۲۵ | ۳۲۴/۱۷ | **+۰/۷۵** |

ماخذ: یافته‌های مطالعه

روند حجم برداشت از منابع زیرزمینی و تغییرات ذخایر زیرزمینی در نمودار (۶) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در طول دوره مورد بررسی، روند برداشت از منابع زیرزمینی افزایشی و جریان‌های خروجی بیشتر از جریان‌های ورودی ارزیابی شده است. لذا هر سال بر حجم این منبع حیاتی کاسته شده و سیستم منابع آب را در وضعیت نامطلوبی قرار می‌دهد.

نتایج حاکی از آن است که در ابتدای دوره شبیه‌سازی حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی معادل ۲۱۲/۵۱ میلیون مترمکعب است و با رشدی ۱۰ درصدی در سال ۱۴۱۰ به بیشترین میزان خود یعنی ۲۳۴/۴۰ میلیون مترمکعب می‌رسد. به‌طورکلی میانگین درصد تغییر سالانه متغیر حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی معادل ۰/۸۴ درصد محاسبه شده است.




نمودار (۶)- تغییرات برداشت (میلیون مترمکعب) و ذخیره آب زیرزمینی (درصد) در شرایط ادامه وضع موجود

وضعیت سیستم منابع آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد در شرایط ادامه وضعیت موجود به کمک شاخص‌های منابع آب، ارزیابی شد. جدول (۶) مقادیر به دست آمده برای چهار شاخص ارزیابی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری و شاخص حداکثر کمبود

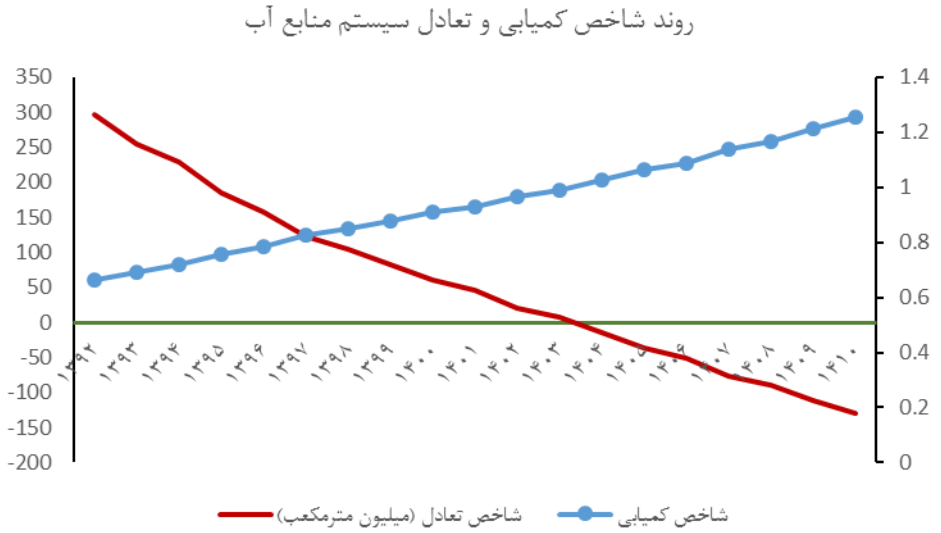
به ترتیب معادل ۰/۵۰، ۰/۱۱۹ و ۰/۲۱۳ برآورد شده است. همچنین، شاخص ترکیبی پایداری سیستم معادل ۰/۷۰۳ می‌باشد که توانایی سیستم در فراهم نمودن و تأمین تقاضای آب در درازمدت را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر عدم توانایی سیستم منابع آب در پاسخگویی به تقاضای فزاینده آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد است. مثبت بودن شاخص حداکثر کمبود بیان می‌کند که در برخی از سال‌های مورد بررسی مقدار تقاضای آب از مقدار عرضه آن پیشی گرفته و سیستم منابع آب با کم‌آبی مواجه است. بنابراین، با توجه به نتایج به‌دست آمده احتمال عدم تأمین تقاضای فزاینده آب، درنتیجه افزایش جمعیت و سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، در دوره مورد مطالعه با استفاده از منابع آب در دسترس پیش‌بینی می‌شود.

جدول (۶). نتایج شاخص‌های منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد

| شاخص | شاخص قابلیت اطمینان | شاخص آسیب پذیری | شاخص حداکثر کمبود | شاخص پایداری سیستم |
|---|---|---|---|---|
| شاخص منابع آب | ۰/۵۰ | ۰/۱۱۹ | ۰/۲۱۳ | ۰/۷۰۳ |

مأخذ: یافته‌های مطالعه

نمودار (۷) روند شاخص کمیابی و شاخص تعادل آب را در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد نشان می‌دهد. همان‌طور که پیداست با رشد تقاضای آب و افزایش برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی شاخص کمیابی در حال افزایش و شاخص تعادل در حال کاهش است، به‌طوری‌که در برخی از سال‌ها این شاخص مقدار منفی نیز به خود می‌گیرد. کاهشی بودن شاخص تعادل آب و یا حتی پایین‌تر از صفر بودن آن، تاکیدی بر لزوم اجرای گزینه‌های مدیریت عرضه و یا تقاضای آب جهت دستیابی به مدیریت پایدار آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد دارد.




نمودار (۷)- روند شاخص کمیابی و تعادل و سرانه آب در دسترس در شرایط ادامه وضع موجود

**ارزیابی اثر سیاست‌های مدیریت تقاضای آب**

ارزیابی تأثیر سیاست‌های مورد بررسی بر سیستم منابع آب حوضه آبریز رودخانه خیرآباد، از طریق محاسبه شاخص‌های منابع آب قابل تعقیب است. همانطور که در قسمت‌های قبل نشان داده شد، قبل از اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی، شاخص قابلیت اطمینان و پایداری سیستم منابع در دوره مورد بررسی به ترتیب معادل ۰/۵۰ و ۰/۷۰۳ بدست آمده است. به عبارت دیگر

با توجه به رشد جمعیت در حوضه مورد مطالعه و تغییرات سطح زیرکشت محصولات کشاورزی، توانایی سیستم در پاسخگویی به تقاضای فزاینده آب در دراز مدت پایین ارزیابی شده است. لذا، اعمال سیاست‌های مدیریتی عرضه و یا تقاضا محور در جهت مدیریت پایدار منابع آب امری اجتناب ناپذیر است.

همانطور که در جدول (۷) مشخص است، پس از اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی، شاخص پایداری سیستم منابع نسبت به قبل از اعمال آن‌ها از رشد قابل توجهی برخودار است. در این بین سیاست افزایش راندمان آبیاری و حذف محصولات آب بر از الگوی کشت منطقه منجر به افزایش شاخص‌های قابلیت اطمینان و پایداری سیستم منابع آب، به عدد یک شدند. این نتیجه حاکی از آن است با اتخاذ استراتژی‌های مورد نظر می‌توان به اطمینان در تأمین تقاضای فزاینده آب در دراز مدت دست یافت.

نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد که استراتژی کاهش نیاز آبی محصولات کشاورزی می‌تواند شاخص پایداری سیستم منابع آب را از ۰/۵۰ به ۰/۸۵۷ افزایش دهد. میزان اثربخشی این سیاست بر پایداری سیستم منابع آب در حدود ۳۲ درصد ارزیابی شده است. با توجه به کوچک‌تر از یک بودن شاخص قابلیت اطمینان و پایداری سیستم تحت این شرایط، می‌توان انتظار داشت که در برخی از سال‌های مورد مطالعه، سیستم منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد از نظر تأمین تقاضای آب آسیب پذیر باشد. اما با توجه به افزایش شاخص پایداری تا ۰/۹۳۰ پس از اعمال سیاست کاهش نیاز آبی محصولات، می‌توان به دستیابی به اطمینان کامل در تأمین تقاضای آب در نتیجه اجرای سیاست‌های کمکی دیگر در کنار این سیاست امید داشت. در صورتی‌که مدیریت منابع آب در بخش خانگی از طریق اصلاح تعرفه آب شرب مدنظر باشد، می‌تواند شاخص پایداری سیستم منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد را تا ۰/۷۴۹ افزایش دهد. با توجه به کشش قیمتی پایین تقاضای آب در بخش خانگی، افزایش قیمت آب به تنهایی اثربخشی لازم در جهت مدیریت پایدار منابع آب را نخواهد داشت. اما با توجه به تأثیر مثبت این سیاست بر شاخص‌های قابلیت اطمینان و شاخص پایداری سیستم، می‌توان به مساعدت این سیاست در کنار سایر سیاست‌های مدیریت تقاضا و یا عرضه آب امید داشت. به طور جزئی تر، با افزایش قیمت آب شرب، با فرض ثابت بودن سایر شرایط حاکم بر سیستم، شاخص پایداری سیستم منابع آب در حدود ۶/۵۴ درصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، این اجرای این سیاست می‌تواند شاخص آسیب‌پذیری سیستم منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد را تا ۱۲/۶ کاهش دهد. اگر سیاست کاهش مصرف سرانه آب در بین خانوارهای شهری و روستایی مد نظر قرار گیرد می‌تواند پایداری سیستم منابع اب را تا ۰/۹۶۳ افزایش دهد. بنابراین، به نقش قابل توجه این سیاست در کنار سیاست‌های مکمل دیگر به منظور دستیابی به اطمینان در تأمین تقاضای آب در دراز مدت می‌توان امیدوار بود. اعمال سیاست تأمین بخشی از تقاضای آب شرب در حوضه مورد مطالعه از طریق انتقال بین حوضه‌ای منجر به کاهش برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی شده و انتظار می‌رود با توجه به افزایش حجم آب در دسترس نسبت به قبل از اعمال سیاست شاخص پایداری منابع آب افزایش و شاخص آسیب پذیری کاهش یابد. تحت این شرایط سیستم منابع آب پایدار خواهد بود.

جدول (۷)- اثر سیاست‌های مورد مطالعه بر شاخص‌های منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد

| شاخص | قابلیت اطمینان | آسیب-پذیری | حداکثر کمبود | پایداری |
|---|---|---|---|---|
| افزایش راندمان | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ |
| کاهش نیاز آبی محصولات | ۰/۸۵۷ | ۰/۰۲۶ | ۰/۰۳۷ | ۰/۹۳۰ |
| تغییر الگوی کشت | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ |
| اصلاح تعرفه آب شرب | ۰/۵۷۱ | ۰/۱۰۴ | ۰/۱۸۰ | ۰/۷۴۹ |
| کنترل مصرف سرانه آب خانگی | ۰/۹۲۹ | ۰/۰۲۰ | ۰/۰۲۰ | ۰/۹۶۳ |
| کاهش برداشت آب | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ |

**نتیجه گیری و پیشنهادها**

طی چندسال اخیر منابع آب در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد به دلیل خشک‌سالی و اثرات تغییر اقلیم با کمبود مواجه شده است. بر اساس اطلاعات و

آمار مرکز ملی خشک‌سالی و مدیریت بحران کشور، استان کهگیلویه و بویراحمد که بخش قابل توجهی از آن در حوضه آبریز مورد مطالعه قرار دارد در هفت سال گذشته وضعیت بحرانی را از نظر بارندگی تجربه کرده است. نتایج محاسبه شاخص خشک‌سالی در این استان حاکی از آن است که در مقیاس بلندمدت تمامی نقاط استان درگیر درجات مختلفی از خشک‌سالی بوده و خشک‌سالی شدید و بسیار شدید در شمال و جنوب استان کهگیلویه و بویراحمد تداوم دارد. همچنین در نتیجه تغییر شرایط آب و هوایی میزان جریان‌های ورودی به حوضه و حجم آب ذخیره شده در سد کوثر در طول زمان روند نزولی داشته است. با توجه به اینکه از جمله اهداف اصلی احداث سد کوثر تأمین آب شرب استان‌های جنوبی کشور است، کاهش حجم ذخیره منابع آب در نتیجه برداشت‌های فزاینده به جهت پاسخگویی به تقاضای پیش رو و همچنین، کاهش بارش و افزایش تبخیر، نگرانی‌هایی را در جهت تنش آبی در این منطقه ایجاد کرده است. این مسئله خود تأکیدی بر لزوم مدیریت پایدار این منبع حیاتی دارد. تحلیل و ارزیابی جامع از وضعیت فعلی و آینده این حوضه آبریز بر اساس یک دیدگاه سیستمی و مدیریت یکپارچه منابع آب می‌تواند به بهبود شرایط حوضه آبریز مورد مطالعه از نظر پایداری منابع کمک شایانی نماید. بنابراین هدف اصلی مطالعه حاضر توسعه یک مدل یکپارچه بر اساس برهمکنش عناصر مختلف در حوضه آبریز رودخانه خیرآباد و مطالعه رفتار سیستم منابع آب در آینده و در نهایت ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی منابع آب در حوضه به جهت دستیابی به پایداری است. بر اساس مفاهیم ارایه شده از روش سیستم دینامیک، ساختاری از سیستم از طریق نمودار حلقه‌های علی-معلولی و ذخیره-جریان طراحی شد که بتواند رفتاری مشابه با رفتار متغیرهای مرجع ارائه نماید. در این مرحله بر اساس یک مدل ذهنی متغیرهای مهم مرتبط با مسئله مشخص و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر هم و اثرات متقابلشان بصورت نمودار حلقه علی-معلولی رسم شد. در ادامه با تبدیل نمودار حلقه‌های علی-معلولی به نمودار ذخیره-جریان روابط ریاضی حاکم بر سیستم وارد مدل شد. سپس، رفتار متغیرهای کلیدی سیستم تا افق ۱۴۱۰ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که حجم تقاضای آب در بخش خانگی و صنعتی که تحت تأثیر رشد جمعیت می‌باشند، در حال افزایش است. تقاضای آب در بخش کشاورزی نیز در طول دوره مورد بررسی اگرچه با نوساناتی همراه می‌باشد. اما در طول دوره دارای روندی افزایشی است. نوسانات موجود در رفتار متغیر تقاضای آب در بخش کشاورزی با توجه به ثابت فرض کردن نیاز آبی محصولات، به سطح زیر کشت شبیه سازی شده بر اساس مدل نرلاو مربوط است. به دلیل رشد تقاضای آب در بخش‌های خانگی و صنعتی و همچنین ،بخش کشاورزی، حجم برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی افزایش یافته و حجم آب در دسترس روند نزولی را طی خواهد نمود. لذا، سیستم منابع آب در پاسخگویی به تقاضای فزاینده در آینده‌ای نزدیک آسیب پذیر است. این نکته در روند شاخص کمیابی و تعادل محاسبه شده برای سیستم منابع آب نیز قابل پیگیری است. به‌طور که شاخص کمیابی تحت شرایط پایه، دارای روندی صعودی و شاخص تعادل دارای روند کاهشی است. بنابراین، می-توان انتظار داشت سیستم منابع آب با ادامه شرایط موجود، در آینده در وضعیت نا مطلوبی از نظر دسترسی به منابع آب قرار خواهد گرفت. مقادیر شاخص‌های محاسبه شده تأییدی بر لزوم اجرای سیاست‌های مدیریت منابع آب است.

نتایج نشان داد که در بین سیاست‌های بررسی شده افزایش راندمان آبیاری در بخش کشاورزی بیشترین تأثیر را بر شاخص پایداری منابع آب دارد. بنابراین با توجه به بهبود وضعیت سیستم منابع آب از نظر شاخص‌های منابع آب، می‌توان به نقش موثر افزایش راندمان آبیاری در جهت مدیریت پایدار منابع آب امید بیشتری داشت. نتایج مطالعه Kotir *et al.* (2016)، Gohari *et al.* (2017)، Wu *et al.* (2013) و Sušnik *et al.* (2012) نیز نشان داد بهبود راندمان آبیاری نقش بسزایی در کاهش برداشت از منابع و افزایش ذخیره آب خواهد داشت. باتوجه به این که اطلاعات اندک غالب کشاورزان در مورد روش‌های جدید آبیاری مزارع یکی از دلایل اصلی عدم کاربرد آن توسط آنان تلقی می‌شود، توصیه می‌شود اطلاعات موردنیاز در مورد معرفی روش-های جدید آبیاری مزارع و مزایای آن در اختیار

کشاورزان قرار گیرد. با اعطای وام و کمک‌های بلاعوض و برگزاری دوره‌های آموزشی، زمینه به کارگیری روش-های جدید آبیاری توسط کشاورزانی که فاقد بضاعت مالی کافی برای تأمین هزینه‌های اجرای روش‌ها هستند، فراهم شود. با توجه به اینکه افزایش راندمان آبیاری ممکن است از طریق ذخیره آب انگیزه‌ای برای افزایش سطح زیرکشت باشد، لذا نظارت در حین اجرای این سیاست نیز حائز اهمیت است.

پس از سیاست بهبود راندمان آبیاری، حذف محصولات آب بر از الگوی کشت بیشترین تأثیر را بر کاهش تقاضای آب و در نتیجه کاهش برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی داشته است. با توجه به نقش حیاتی بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و اشتغالزایی و تأمین غذای جامعه، لازم است که از منابع و ابزارهای تولید در این بخش به بهترین نحو ممکن استفاده گردد تا ضمن کاهش در مصرف این منابع، سودآوری و رفاه کشاورزان نیز افزایش یابد. با تغییر الگوی کشت در مناطق با پتانسیل آب کمتر از محصولاتی که به آب زیاد در طول دوره رشد خود نیازمند هستند، مانند برنج، به سمت محصولات با مقاومت بالاتر نسبت به کم آبی و محصولاتی که سازگاری بیشتری با شرایط اقلیمی و منطقه‌ای دارند می‌توان گامی در جهت مدیریت صحیح مصرف آب و افزایش بهره‌وری برداشت. با توجه تأثیرات منفی انتظاری اتخاذ این استراتژی بر تولید و درآمد کشاورزان در حوضه مورد بررسی، توسعه فعالیت‌های غیر زراعی و صنایع کوچک تبدیلی در روستاها به‌منظور جبران آسیب‌های ناشی از تغییرپذیری‌های احتمالی شرایط آب و هوایی می‌تواند موثر واقع شود.

با توجه به بالا بودن سرانه مصرف آب، بدون شک در صورت ادامه روند موجود و سوء مدیریت در مصرف آب در بخش خانگی و کشاورزی، منطقه مورد مطالعه در آینده‌ای نه چندان دور با بحران‌های جدی منابع آب مواجه خواهد شد و افزایش جمعیت این مشکلات را حادتر خواهد کرد. بنابراین پایش و نظارت مستمر بر مصرف آب شرب و به حداقل رساندن تلفات آب در تاسیسات آبرسانی و ارتقا سطح مدیریت تقاضا و پرداختن به مسایلی از قبیل لوازم و شیرآلات مصرفی در منازل و اماکن دولتی و سایر واحدهای مصرف کننده آب و همچنین آموزش افراد در جهت استفاده بهتر از این منبع حیاتی می‌تواند به مصرف بهینه منابع آب موجود کمک شایان توجهی نماید. اگرچه اثربخشی اصلاح قیمت آب شرب بر کاهش حجم تقاضای آب و افزایش پایداری سیستم پایین ارزیابی شد اما می‌توان به نقش موثر و کمکی این سیاست در کنار سایر سیاست‌های تقاضا محور و یا عرضه محور امید داشت.

## ضمیمه

الف) اطلاعاتی برخی از متغیرهای بکار رفته در سیستم دینامیک طراحی شده

| متغیر | مقدار کمی | متغیر | مقدار کمی |
|---|---|---|---|
| نرخ رشد جمعیت<br>Population growth rate | 1.54-1.68-1.59 Percent | مساحت حوضه<br>Area of Basin | 4232.5 $km^2$ |
| جمعیت اولیه<br>Initial population | 1.993 million person | نرخ نفوذ<br>Percolation rate | 12 percent |
| نرخ شهرنشینی<br>Urbanization rate | 67 Percent | نرخ رواناب<br>Runoff rate | 16 percent |
| سرانه مصرف آب شهری<br>urban percapita water use | 64.3 $m^3$/year | بارندگی<br>Precipitation | سری زمانی بلند مدت<br>Time series |
| سرانه مصرف آب روستایی<br>Rural percapita water use | 36.6 $m^3$/year | دما<br>Temperature | سری زمانی بلند مدت<br>Time series |
| سرانه آب مصرفی صنعتی<br>Industrial percapita water use | 2.31 $m^3$/year | نیاز زیست محیطی<br>Environmental water demand | 79 mcm |
| حجم آب سطحی اولیه<br>Initial available surface water | 996.54 mcm | نیاز آبی محصولات<br>Water requirement | NETWAT |

## REFERENCES


1. 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. *Sustainability, 7*, 6957–6975.
2. Arnell, N. W., Vuuren, D. P., & Isaac, M. (2011). The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. *Global Environmental Change, 21*, 592-603.
3. Assaraf, O.B.Z., & Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of earth system education. *Journal of Research in Science Teaching, 42*, 518-560.
4. Atherton, J. T. (2013). *A System Dynamics Approach to Water Resources and Food Production in the Gambia* (Doctoral Dissertation, the University of Western Ontario).
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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. *International Conference of the System Dynamics Society* (pp. 1-21). System Dynamics Society.
9. Doll, P. (2002). Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: a Global Perspective. *Climatic Change, 54*, 269-293.
10. FAO. (2011). Climate Change, Water and Food Security. FAO Water Report, Food and Agricultural Organization. *Rome, Italy*.
11. Fisher, G., Tubiello, F., van Velthuizen, H., & Wiberg, D. (2006). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. *Technological Forecasting and Social Change, 74*, 1083–1107.
12. Ford, F. A. (1999). *Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems*. Island Press.
13. Forrester, J. W. (1961). Industrial dynamics. *Journal of the Operational Research Society, 48*, 1037-1041.
14. Forrester, J.W. (1994). System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review, 10*, 245-256.
15. 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.
16. Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." Water Resour. Res., 18(1), 14–20.
17. 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.
18. Hjorth, P., & Bagheri, A. (2006). Navigating towards sustainable development: a system dynamics approach. *Futures, 38*, 74–92.
19. 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.
20. Langsdale, S., Beall, A., Carmichael, J., Cohen, S., & Forster, C. (2007). An exploration of water resources futures under climate change using system dynamics modeling. *Integrated Assessment, 7*, 1-17.
21. Loucks, D. P. (1997). "Quantifying trends in system sustainability." Hydrol.Sci. J., 42(4), 513–530.
22. Madani, K. (2010). *Towards sustainable watershed management: Using system dynamics for integrated water resources planning*. VDM Publishing.
23. Madani, K., & Mariño, M. A. (2009). System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Water Resources Management, 23*, 2163-2187.
24. McCartney, M., Forkuor, G., Sood, A., Amisigo, B., Hattermann, F., & Muthuwatta, L. (2012). *The water resource implications of changing climate in the Volta River Basin (Vol. 146).* IWMI.
25. McMahon, T. A., Adeloye, A. J., and Sen-Lin, Z. (2006). "Understanding performance measures of reservoirs." J. Hydrol. (Amsterdam), 324 (2006) 359–382.
26. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The limits to growth Universe Books.* New York.

**27.** Mirchi, A., Watkins Jr, D., & Madani, K. (2010). Modeling for watershed planning, management, and decision making. *Watersheds: Management, restoration and environmental impact* (pp. 1-25). Nova Science Publishers, Inc**.**
28. Richmond, B. (1993). Systems thinking: critical thinking skills for the 1990s and beyond. *System Dynamic Review, 9*, 113–133.
29. Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., & Loucks, D. P. (2010). Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *137*(5), 381-390.
30. Simonovic, S. P. (2012). *Managing water resources: methods and tools for a systems approach*. Routledge.
31. Simonovic, S. P., & Fahmy, H. (1999). A new modeling approach for water resources policy analysis. *Water Resources Research, 35*, 295–304.
32. Sterman, J. D. (2000). System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. *California Management Review*, *43*, 8-25.
33. 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.
34. Varian, H. R. (1996). *Intermediate Microeconomics: A Modern Approach, WW Norton Company*. New York.
**35.** Wu, G., Li, L., Ahmad, S., Chen, X., & Pan, X. (2013). A dynamic model for vulnerability assessment of regional water resources in arid areas: a case study of Bayingolin, China. *Water Resources Management, 27*, 3085-3101.
36. Yang, C. C., Chang, L. C., & Ho, C. C. (2008). Application of system dynamics with impact analysis to solve the problem of water shortages in Taiwan. *Water Resources Management*, *22*, 1561-1577.
37. Zhuang, Y. (2014). A system dynamics approach to integrated water and energy resources management.