



## Simulation of Water Shortage Crisis in Rafsanjan using System Dynamics

Nasser Shahsavari-Pour<sup>1\*</sup>, Mojtaba Afshar-Jahanshahi<sup>2</sup>

1. Professor Department of Industrial Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Iran. Email: [nasser.shahsavari@alum.sharif.edu](mailto:nasser.shahsavari@alum.sharif.edu) 2. Assistant Professor of Accounting, Faculty of Administrative Sciences and Economics. Email: [afshar@vru.ac.ir](mailto:afshar@vru.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article type:

Research Paper

#### Article History:

Received 17 May 2025

Revised 7 July 2025

Accepted 13 September 2025

Published Online 23 September 2025

#### Keywords:

system dynamics,  
water shortage,  
water sources,  
water shortage crisis,  
Rafsanjan city.

### ABSTRACT

Water shortage crisis and its interconnected and integrated management are one of the life crises of the current period. Factors such as population growth, diversity and plurality of population needs, traditional farming method and etc. help to increase the domain of this crisis. The complexity of water sources and consumption's system makes hard the management process of its sources and decision making about it. The aim of this research is to study the effective factors in water sources and consumption's system of Rafsanjan city and make a simulated model of water shortage and its causes based on the system dynamics approach. In this research, in the beginning, water sources and consumption's system of the Rafsanjan city were simulated; then with the help of the statistical method of design of experiments the involved variable in the water shortage in the Rafsanjan city were tested and also with the help of this method sensitive variables in the system were adjusted. Finally, scenarios based on the obtained amount of the above method were presented for coping with the water shortage in this city.

**Cite this article:** Shahsavari-Pour, N., Afshar Jahanshahi, M. (2025). Simulation of Water Shortage Crisis in Rafsanjan using System Dynamics. *Energy Systems: Technology and Management*, 1 (1), 43-57. DOI: <http://doi.org/10.48306/estm.2025.232461>



© Graduate University of Advanced Technology.  
DOI: <http://doi.org/10.48306/estm.2025.232461>

\* Corresponding author.

Email:

[nasser.shahsavari@alum.sharif.edu](mailto:nasser.shahsavari@alum.sharif.edu)



## شبیه‌سازی بحران کمبود آب در شهر رفسنجان با استفاده از پویایی‌های سیستم

ناصر شهسواری پور<sup>۱\*</sup>، مجتبی افشار جهانشاهی<sup>۲</sup>

۱. استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: [nasser.shahsavari@alum.sharif.edu](mailto:nasser.shahsavari@alum.sharif.edu)

۲. استادیار حسابداری دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران. رایانامه: [afshar@vru.ac.ir](mailto:afshar@vru.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
	<b>نوع مقاله:</b> پژوهشی
	<b>تاریخ های مقاله:</b> تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱
	<b>کلیدواژه:</b> پویایی سیستم، کمبود آب، منابع آب، بحران کمبود آب، شهر رفسنجان.
از جمله بحران‌های زندگی در دوره حاضر بحران کمبود آب و مدیریت به‌هم‌پیوسته و یکپارچه آن است. عواملی مانند افزایش جمعیت و تنوع و تعدد نیازهای جمعیتی، شیوه کشاورزی سنتی و غیره به افزایش دامنه این بحران کمک می‌کنند. پیچیدگی سیستم منابع و مصارف آب موجب دشوار شدن فرایند مدیریت منابع آن و همچنین دشواری تصمیم‌گیری درباره آن شده است. هدف این پژوهش بررسی عوامل مؤثر در سیستم مدیریت منابع و مصارف آب شهر رفسنجان و همچنین ساخت مدلی شبیه‌سازی شده از کمبود آب و علل آن بر پایه رویکرد پویایی‌های سیستم است. در این پژوهش ابتدا سیستم مدیریت منابع مصارف آب شهر رفسنجان شبیه‌سازی شد. سپس متغیرهای دخیل در کمبود آب در شهر رفسنجان مورد آزمایش قرار گرفتند و همچنین به تنظیم متغیرهای حساس درون این سیستم پرداخته شد. در نهایت سناریوهایی بر اساس مقادیر به دست آمده از روش مذکور برای مقابله با بحران کمبود آب در این شهرستان ارائه شد.	
	<b>استناد:</b> شهسواری پور، ناصر، و افشار جهانشاهی، مجتبی (۱۴۰۴). شبیه‌سازی بحران کمبود آب در شهر رفسنجان با استفاده از پویایی‌های سیستم. سیستم‌های انرژی: فناوری و مدیریت، ۱ (۱) ۵۷-۴۳. DOI: <a href="http://doi.org/10.48306/estm.2025.232461">http://doi.org/10.48306/estm.2025.232461</a>



\* نویسنده مسئول.

رایانامه:

[nasser.shahsavari@alum.sharif.edu](mailto:nasser.shahsavari@alum.sharif.edu)

## ۱. مقدمه

آب حیاتی‌ترین منبع طبیعی است که کمبود شدید آن موجب نگرانی جهانی شده [۱] و مسائل و مشکلات مرتبط با آن محدودیتی جدی برای توسعه و استمرار فعالیت‌های انسانی در آینده نزدیک است [۲]. همچنین منابع آب نقش مهمی در توسعه جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی دارند [۳]. از این رو، مدیریت و برنامه‌ریزی مؤثر آن‌ها از جمله نگرانی‌های مهم در رابطه با توسعه اقتصادی پایدار شهری<sup>۱</sup> است [۴]. علاوه بر این، کشورهای بسیاری در جهان مسائل و مشکلات مرتبط با منابع آب را تجربه می‌کنند کمبود آب شیرین<sup>۲</sup> در جهان به‌عنوان بحران عمده قرن بیست و یکم ذکر شده است. خشک‌سالی‌های مکرر همراه با برداشت بیش از اندازه آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق شبکه بزرگی از زیرساخت‌های هیدرولیک و چاه‌های عمیق وضعیت آبی کشور را تا یک سطح بحرانی تشدید کرده است. خشک شدن دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها<sup>۳</sup>، کاهش آب‌های زیرزمینی، فرونشست زمین<sup>۴</sup>، تخریب کیفیت آب<sup>۵</sup>، فرسایش خاک<sup>۶</sup>، بیابان‌زایی<sup>۷</sup> و طوفان‌های گردوغبار مکرر<sup>۸</sup> شواهدی از وضعیت بحرانی آب در کشور هستند [۵]. مدیریت منابع آب نیازمند تصمیم‌گیری آینده‌نگر با رویکردی جامع است. علم پویایی سیستم، یک ابزار مدیریتی بر اساس این نگرش می‌باشد. این علم قادر است شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب را برای پشتیبانی تصمیم‌گیری انجام دهد. از سوی دیگر، آب‌شناسی و موضوعات مدیریت منابع آب به دلیل شرایط آب‌وهوای محلی (مانند تغییر در الگوی توزیع بارندگی)، ارتباط آب‌های سطحی زیرزمینی، ذخیره طبیعی و صرفه‌جویی انسانی، رشد جمعیت و تقاضا در بین سایر عوامل پیچیده هستند؛ و این ویژگی‌ها مسائل هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب را برای مطالعه به‌وسیله روش‌شناسی پویایی‌های سیستم متناسب می‌سازد [۵]. پویایی سیستم رویکردی برای حل مسائل مدیریتی مبتنی بر نظریه بازخور اطلاعات و کنترل آن است. مراحل مدل‌سازی پویایی سیستم عبارت است از تعیین مسئله (انتخاب مرزها)، تدوین فرضیات پویا، تدوین مدل شبیه‌سازی شده، آزمون، طراحی و ارزیابی سیاست [۶] دو ابزار مهم تفکر سیستمی نمودارهای علی و معلولی و حالت جریان هستند. نمودارهای علی و معلولی نشان‌دهنده روابط علت و معلولی و بازخورهای بین متغیرها هستند. در این نمودارها متغیرها به وسیله پیکان‌هایی<sup>۹</sup> که از هر علت به معلول متصل می‌شود نشان داده می‌شوند. تفکر پویایی سیستم شاخه‌ای از تفکر سیستمی است که بر درک رفتار سیستم‌های پیچیده تأکید دارد. این روش بر مقوله‌های چهارگانه مرز سیستم، شبکه حلقه‌های بازخورد، متغیرهای نرخ یا جریان و سطح یا حالت، نقاط اهرمی تأکید دارد و با

در نظر گرفتن روابط غیرخطی سیستم و تأخیرات زمانی و جریانات شکل‌دهنده‌ی حالت سیستم مکانیسم‌های شکل‌دهنده‌ی ساختار سیستم را شناسایی می‌نماید.

از طرفی با توجه به اینکه حیات مناطق کویری و اقلیم‌های خشک و نیمه خشک، به دلیل کمی بارندگی کاملاً وابسته به منابع آب زیر زمینی است. می‌توان گفت مدیریت مناسب آب‌های زیر زمینی در چنین مناطقی ضامن توسعه پایدار در آن مناطق است.

بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارائه راهکارهایی برای حل مسئله بحران آب در شهر رفسنجان با استفاده از پویایی‌های سیستم انجام شد که در راستای آن اهداف فرعی شناسایی عوامل مؤثر در بحران آب، شناسایی عوامل مؤثر کلیدی، شبیه‌سازی منابع آب دنبال می‌شوند. سوالاتی که این پژوهش در پی پاسخگویی به آنهاست عبارتند از: کدام عوامل در بحران آب در شهر رفسنجان مؤثرند؟ کدام عوامل حساس و کلیدی هستند؟ و برای مدیریت بهتر منابع آب و مسائل مرتبط با آن چه سناریوهایی قابل طرح و تعریف هستند؟

## ۲. پیشینه پژوهش

در زمینه منابع آبی و مدیریت منابع آب پژوهش‌های مختلفی صورت پذیرفته که از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

گو و همکاران (۲۰۰۱) در پژوهشی مدل پویایی سیستم محیطی که پویایی سیستم ارهای<sup>۱۰</sup> نامیده می‌شد توسعه دادند تا برنامه‌ریزی سیستم مدیریت محیطی حوزه دریاچه‌ی ارهای را به‌منظور توسعه محلی پایدار پشتیبانی کند [۷]. نتایج مدل‌سازی به‌طور مستقیم در شبیه‌سازی و ارزیابی تنوعی از اقدامات تصمیم و پیامدهای پویایشان و همچنین پاسخ به سؤالاتی مانند چه چیزی بهتر است من انجام بدهم؟ چه می‌شود من اگر انجام دهم؟ و پیامدهای مورد انتظار چه هستند؟ مفید بود. هی (۲۰۰۵) در مقاله‌ای با عنوان «کاربرد مدل‌سازی پویایی‌های سیستم برای مطالعه اثر برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در تایوان» فرایندی را برای ترکیب پویایی‌های سیستم و تحلیل اثر پیشنهاد دادند تا به‌طور نظام‌مند و کمی، با ارجاع به کمبود آب<sup>۱۱</sup> و سود اقتصادی که به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب محلی مرتبط هستند راهبردهای آب را ارزیابی کنند [۸]. فنگ همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی به توسعه مدل ارزیابی ریسک کمبود آب با استفاده از روش ارزیابی ریسک مبتنی بر نظریه ابهام اطلاعات<sup>۱۲</sup> در شهر بیوو استان ژجیانگ چین<sup>۱۳</sup> پرداختند. آن‌ها ضمن تحلیل ظرفیت حمل‌کنندگی منابع آب از دیدگاه زیست‌محیطی به شبیه‌سازی تغییرات آن بر اساس مدل پویایی سیستم برای تأیید نتایج نظری آن پرداختند [۹]. چنگ

<sup>7</sup> Desertification

<sup>8</sup> Frequent dust storms

<sup>9</sup> Arrows

<sup>10</sup> Erhai SD

<sup>11</sup> Water shortage

<sup>12</sup> Information diffusion theory

<sup>13</sup> The city of Yiwu in Zhejiang Province, China

<sup>1</sup> Sustainable urban economic development

<sup>2</sup> Freshwater scarcity

<sup>3</sup> Drying lakes, rivers and wetlands

<sup>4</sup> Land subsidence

<sup>5</sup> Water quality degradation

<sup>6</sup> Soil erosion

موثرترین گام در حفظ منابع آب جهت جلوگیری با مواجه شدن چالش‌های محتمل در رابطه با کمبود آب می‌باشد. لذا مطالعه آب در مناطق مختلف به بهره‌برداری مناسب از منابع آب آن مناطق کمک می‌کند، به طریقی که بتوان با اعمال بهترین سناریوی مدیریتی باعث پایداری منابع آب در آن مناطق شد.

### ۳. روش پژوهش

در این مطالعه با کمک توسعه مدل پویایی سیستم یک مدل دینامیکی برای بحران آب شهر رفسنجان طراحی و با شبیه‌سازی آن طی یکصد سال به پیش‌بینی وضعیت این بحران پرداخته شد.

این پژوهش با توجه به مطالعاتی که صورت پذیرفته و در دسترس بودن داده‌ها متغیرهایی را برگزیده است که مرتبط با خرده سیستم‌های عرضه آب، خرده سیستم کشاورزی، خرده سیستم صنعت و خدمات و خرده سیستم خانگی (جمعیت) می‌شود. در این پژوهش از سیستم پویا برای شبیه‌سازی استفاده شده است. سیستم پویا با تکیه بر مکانیزم‌های بازخوردهای پویا در سیستم بوده و با تکیه بر حلقه‌های علی و معلولی به توضیح چگونگی وقوع وقایع می‌پردازد و با استفاده از ساختاری‌های ذخیره و جریان، تاخیرات زمانی، پس‌خوان‌ها و رفتارهای غیر خطی بیان می‌شود. داده‌های مورد نیاز در این پژوهش از سازمان‌های مختلفی از جمله سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان کرمان، سازمان ثبت احوال استان کرمان و شرکت آب منطقه‌ای رفسنجان، اداره جهاد کشاورزی شهرستان رفسنجان و اداره آب و فاضلاب شهرستان رفسنجان به دست آمده است. همچنین برای تحلیل حساسیت متغیرها از روش آماری طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. روش آماری طراحی آزمایش‌ها روشی است که در دهه ۱۹۲۰ تا دهه ۱۹۳۰ با فعالیت‌های سررونالد فیشر<sup>۲۰</sup> در مرکز آزمایش‌های کشاورزی روتامستد لندن<sup>۲۱</sup> آغاز شد. این روش در چهار دوره توسعه یافت که عبارتند از دوره کشاورزی، دوره صنعتی، دوره بهبود کیفیت و دوره استفاده از این روش در حوزه علوم مهندسی و صنایع گوناگون. استفاده از این روش می‌تواند به یادگیری بهتر سیستم‌های در حال کار و نحوه کار فرایندهای آنان کمک کند. مشاهدات پیرامون هر سیستم یا فرایند موجب ایجاد فرضیات و نظراتی درباره آن می‌شود که برای رد و تایید آنها نیاز است آزمایش‌های مختلفی روی آنها صورت گیرد [۱۴]

مدل‌سازی در پویایی‌شناسی سیستم‌ها به شرح زیر بیان می‌شود:

مرحله اول: در این مرحله با استفاده فرضیه‌های دینامیکی که از مطالعه ادبیات تحقیق و دریافت نظرات و قضاوت خبرگان استخراج می‌شود نمودار علی و معلولی کل سیستم ترسیم می‌شود.

(۲۰۱۰) در پژوهشی با عنوان «مدل پویایی سیستم ظرفیت حمل منابع آب سوژو و کاربردهایش» مدلی بر اساس پویایی سیستم برای ظرفیت حمل منابع آب سوژو در چین ارائه داد و در آن سه برنامه بهینه‌سازی مختلف منابع آب تصویب شد که عبارت بودند از: (۱) تداوم استفاده از آب موجود؛ (۲) حفاظت/ذخیره آب؛ و (۳) بهره‌برداری آب [۱۰]. وی و همکاران (۲۰۱۲) مدل پویایی سیستمی را توسعه دادند که تعاملات بین منابع آب، جریان محیطی و اقتصادی و اجتماعی را منعکس می‌کرد که در آن اثرهای اجتماعی و اقتصادی سطوح مختلف تخصیص جریان محیطی در حوزه رودخانه‌وی‌هی چین<sup>۱۴</sup> ارزیابی شد [۱۱]. زی و پوه (۲۰۱۳) در مقاله‌ای در «کنفرانس پژوهش مهندسی سیستم‌ها» در شهر آتالانتا<sup>۱۵</sup> مدل پویایی‌های سیستمی که آب سنگاپور<sup>۱۶</sup> نامیده شد را توسعه دادند و به‌وسیله آن آثار بلندمدت برنامه‌های سرمایه‌گذاری مختلف را تحلیل کردند؛ و نتایج آن نشان داد که سرمایه‌گذاری در کمبود آب‌های زیرزمینی و جمع‌آوری آب‌های سطحی به‌تنهایی برای کسب خودکفایی در آب کافی نیست [۱]. ونگ و همکاران (۲۰۱۴) با توجه به محدودیت‌های روش سنتی در ارزیابی ظرفیت حمل زیست‌محیطی آب و پیچیدگی سیستم زیست‌محیطی آن، با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم، شبکه عصبی مصنوعی و زنجیره مارکوف به مدل‌سازی سیستم زیست‌محیطی آب پرداختند؛ که در آن مؤلفه‌های اجتماعی نیز بر اساس آزمون علیت گرنجر<sup>۱۷</sup> با استفاده از پویایی سیستم مدل‌سازی شد [۱۲]. سان و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی با عنوان «بهینه‌سازی پایداری منابع آب در چین: یک مدل پویایی سیستم» به تقسیم‌بندی عوامل کلان اقتصادی<sup>۱۸</sup> که در استفاده بهینه از منابع آب مؤثرند به پنج خرده سیستم عمده پرداختند که عبارتند از: اقتصاد، جمعیت، عرضه و تقاضای آب، منابع آب، آلودگی و مدیریت آب. آن‌ها در این تحقیق به این نتیجه رسیدند که راه اساسی در پر کردن شکاف بین عرضه و تقاضای آب بهبود عرضه آب نسبت به کنترل تقاضا است [3]. دوران انکالادا و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی تغییر در کیفیت و کمیت آب به دلیل تغییر آب و هوایی را تخمین زدند و اثرش را در توسعه جوامع منطقه مرزی ایالات متحده-مکزیک حوزه رودخانه ریو گراندا/ریو براوو<sup>۱۹</sup> ارزیابی کردند [۱۳]. مطالعه موارد ذکر شده و مرور ادبیات پژوهش بیان می‌کند که توسعه کشاورزی، رشد سریع صنایع و گسترش بی‌رویه جمعیت و عواملی دیگر هر روز بر تقاضای آب تأثیر می‌گذارند. از طرفی با توجه به محدود بودن آب‌های موجود و افزایش مداوم نیازها وجود برنامه‌ریزی صحیح به منظور مدیریت منابع آب و بهره‌برداری بهتر این منابع با ارزش و محدود را طلب می‌کند. در صورتی که از منابع آب موجود به شکل مناسبی بهره‌برداری شود، می‌شود نیازهای فعلی و حتی آینده را مرتفع ساخت. در یک منطقه مدیریت و بهره‌برداری بهینه منابع آب

<sup>19</sup>The US-Mexico border region of the Rio Grande/Rio Bravo Water Basin

<sup>20</sup> Sir Ronald A. Fisher

<sup>21</sup> Rothamsted Agricultural Experimental Station near London, England

<sup>14</sup> Weihe River Basin of China

<sup>15</sup> Atlanta

<sup>16</sup> Singapore Water

<sup>17</sup> Granger causality test

<sup>18</sup> Macroeconomic factors

دست‌یابی به هدف مورد نظر مناسب است، مد نظر قرار می‌گیرد. از طرفی تست مدل و اعتبار آن، قابلیت اعتماد به مدل را افزایش داده و اعتماد به کاربردی بودن را بالا می‌برد. در این تحقیق برای ارزیابی اعتبار مدل از نظر سنجی خبرگان آزمایش‌های متعدد مدل توسط خبرگان استفاده شده است.

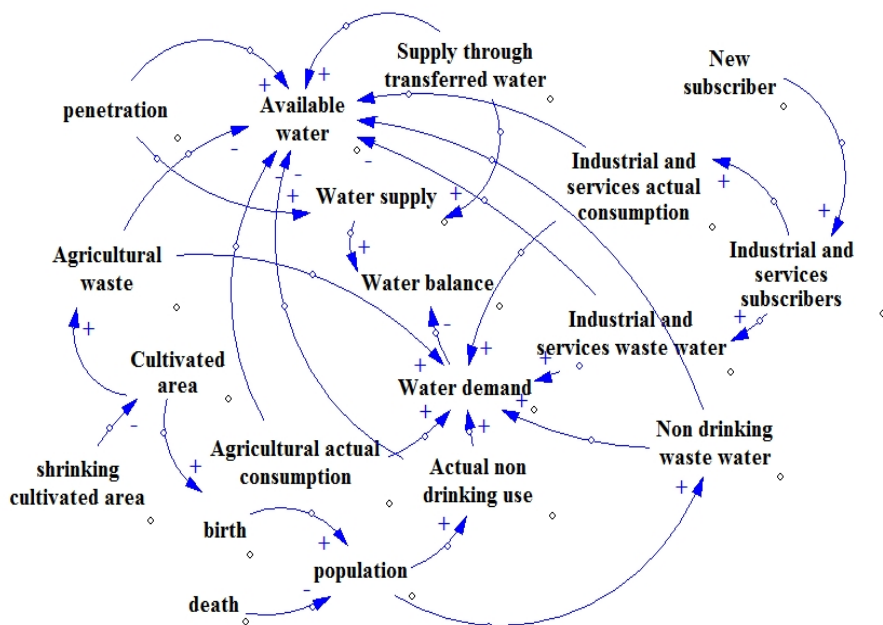
در ادامه به مقایسه وضعیت فعلی و بهینه متغیرها پرداخته می‌شود و راهکارهایی جهت رسیدن به وضعیت بهینه متغیرها ارائه می‌شود.

#### ۴. یافته‌ها

نتایج این پژوهش طی انجام مراحل زیر به شرح زیر است:

گام اول: در گام اول این پژوهش نمودار علی و معلولی سیستم بحران آب ترسیم شد.

شکل (۱) نمودار علی و معلولی کل سیستم نشان داده شده است.



شکل ۱: نمودار علی و معلولی بحران کمبود آب در شهر رفسنجان

به وجود خواهد آمد که اگر به موقع مدیریت نشود باعث خسارات جبران ناپذیری در این شهرستان خواهد شد.

گام دوم. تبیین نقشه حالت جریان و شبیه‌سازی مدل برای این منظور ابتدا متغیرها مدل همراه با شرح و واحدهایشان در جدول (۱) آورده شدند و نمودار حالت جریان کلی مدل در شکل (۲) نمایش داده شده است. در جدول (۱) برای هر متغیر یک علامت اختصاری در نظر گرفته شده است که از این علامت اختصاری برای نوشتن فرمول و رابطه هر متغیر استفاده می‌شود.

مرحله دوم: تبیین نقشه حالت جریان و شبیه‌سازی مدل می‌باشد. نمودارها حالت - جریان ابزار مفیدی برای نشان دادن انباشتگی‌ها و جریان‌های درون مدل هستند. در این مرحله برای هر متغیر یک علامت اختصاری در نظر گرفته شده است که از این علامت اختصاری برای نوشتن فرمول و رابطه هر متغیر در مرحله بعد استفاده می‌شود.

مرحله سوم: تدوین و فرموله کردن مدل و توسعه مدل ریاضی: این مرحله نشان‌دهنده روابط ریاضی به‌کاررفته در شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم بحران کمبود آب در شهر رفسنجان می‌باشد.

اعتبار سنجی مدل‌های پویایی شناسی سیستم برای ایجاد اطمینان نسبت به درستی و سودمندی یک مدل است. از آنجا که طراحی یک مدل با هدف رسیدگی به مشکلات و رفع آنها در زمینه‌های متفاوت می‌باشد، مدل طراحی شده به منظور تطابق با واقعیت مورد سنجش قرار می‌گیرد. در پویایی‌های سیستم، اعتبار سنجی ترکیبی از فعالیت‌هایی است که از همان ابتدای مدل‌سازی آغاز می‌شود، در طی این مراحل بررسی ساختار مدل و ساختار سیستم واقعی، با توجه به ابعاد معادلات مختلف و هم‌خوانی آن‌ها با یک دیگر و اینکه آیا مدل ایجاد شده برای

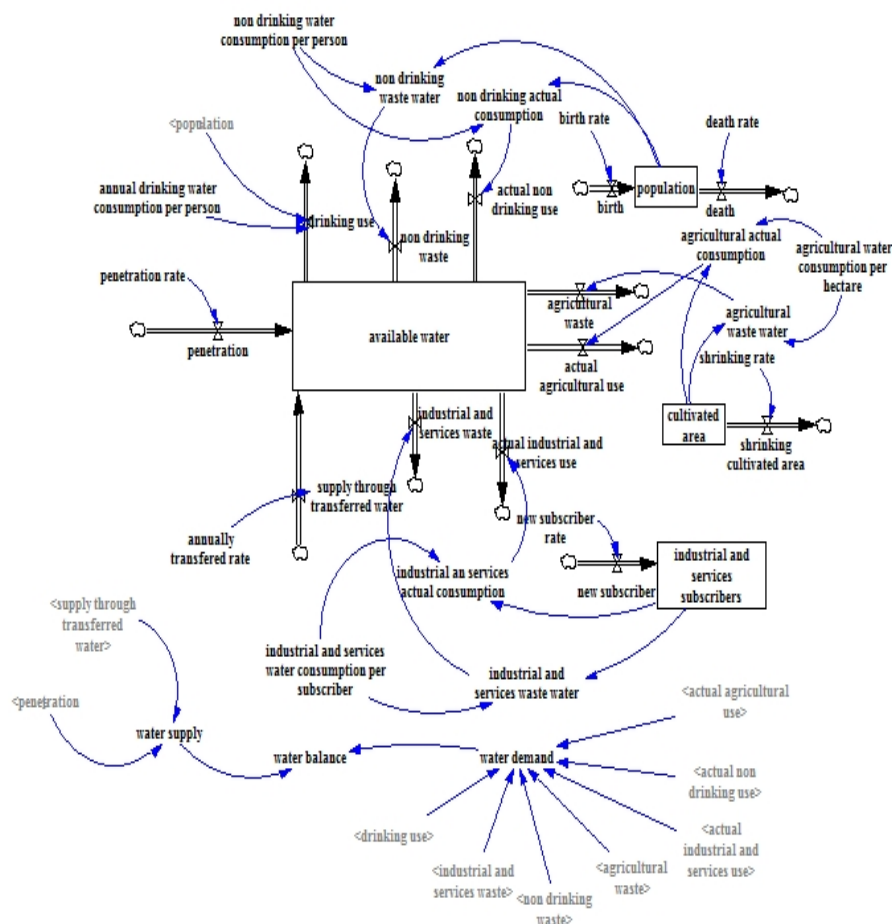
با استفاده فرضیه‌های دینامیکی که از مطالعه ادبیات مباحث مربوطه و دریافت نظرات و قضاوت خبرگان استخراج می‌شود و پس از برگزاری مصاحبه‌های نیمه ساختاریافته با خبرگان نمودار علی و معلولی شکل (۱) ترسیم شد.

همانطور که در شکل نشان داده شده است می‌توان از متغیر مقدار آب موجود به عنوان متغیری نام برد که بیشترین توجه را به خود جلب نموده است لذا اگر مقدار آب موجود کم شود آنگاه مشکلی اساسی

جدول ۱: شرح متغیرهای نمودار حالت جریان همراه با واحدهایشان

Abbreviation	Description	Unit	Abbreviation	Description	Unit	Abbreviation	Description	Unit
PR	Penetration rate	cubic meter/Year	POP	Population	Person	SR	shrinking rate	hectare /Year
P	Penetration	cubic meter/Year	B	Birth	person/Year	AISU	Actual industrial and services use	cubic meter/Year
AW	Available water	cubic meter	BR	Birth rate	person/Year	ISW	Industrial and service waste	cubic meter/Year
DU	Drinking use	cubic meter/Year	D	Death	person/Year	ISAC	Industrial and services actual Consumption	cubic meter/Year
ADWCP	Annual drinking water consumption per person	(Cubic meter/person)/year	DR	Death rate	person/Year	ISWW	Industrial and services waste water	cubic meter/Year
STW	Supply through transferred Water	cubic meter/Year	AGW	Agricultural waste	cubic meter/Year	ISWCP	Industrial and services water consumption per subscriber	(cubic meter/s subscriber)/Year
ATR	Annually transfer rate	cubic meter/Year	AAU	Actual agricultural use	cubic meter/Year	ISS	Industrial and services subscribers	Subscriber
NDW	Non drinking waste	cubic meter/Year	AAC	Agricultural actual consumption	cubic meter/Year	NS	New subscriber	subscriber/Year
ANU	Actual non drinking use	cubic meter/Year	AWW	Agricultural waste water	cubic meter/Year	NSR	New subscriber rate	subscriber/Year
NWW	Non drinking waste water	cubic meter/Year	AWCPH	Agricultural water consumption per hectare	(cubic meter/hectare)/Year	WS	Water supply	cubic meter/Year

NAC	Non drinking actual consumption	cubic meter/Year	CA	Cultivated area	Hectare	WD	Water demand	cubic meter/Year
NWCP	Non drinking water consumption per person	(cubic meter/person)/year	SCA	shrinking cultivated area	hectare /Year	WB	Water balance	Cubic meter/Year



شکل ۲: نمودار حالت- جریان کمبود آب در شهر رفسنجان

خدمات (رابطه ۲۶))، میزان اتلاف آب در بخش کشاورزی (رابطه ۱۸))، میزان مصرف آب آشامیدنی در هرسال (رابطه ۶))، میزان اتلاف آب غیر آشامیدنی (رابطه ۸))، میزان اتلاف صنعت و خدمات (رابطه ۲۸))، مقدار اولیه این متغیر برابر ۴ میلیارد مترمکعب است.

رابطه (۲) نشان‌دهنده مقدار نفوذ در سفره‌های زیرزمینی است که برابر ست با نرخ نفوذ که رابطه آن در روابط (۳ و ۴) نشان داده شده است.

$$P=PR \quad (۳)$$

$$PR=50000000 \quad (۴)$$

گام سوم: تدوین و فرموله کردن مدل و توسعه مدل ریاضی: معادلات زیر نشان‌دهنده روابط ریاضی به‌کاررفته در شبیه‌سازی مدل پویایی سیستم بحران کمبود آب در شهر رفسنجان هستند:

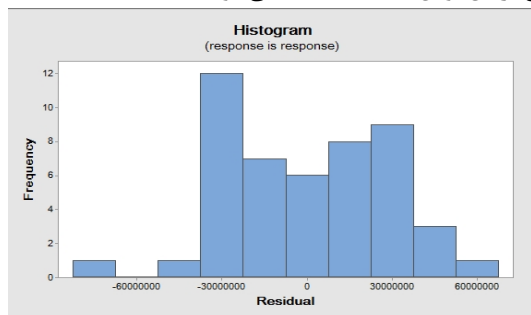
$$AW=INTEG(P+STW-AAC-ANU-AISU-AGW-DU-NDW-ISW,400000000) \quad (۱)$$

رابطه (۱) نشان‌دهنده متغیر حالت آب‌های در دسترس (آب‌های موجود) است. متغیرهای ورودی این متغیر عبارت‌اند از نفوذ در سفره‌های زیرزمینی (رابطه ۲)) و مقدار آب انتقال داده‌شده به سیستم (رابطه ۴)) و متغیرهای خروجی آن برابر است با مصرف واقعی آب کشاورزی (رابطه ۲۰))، میزان آبی که صرف مصرف واقعی غیر آشامیدنی آب می‌شود (رابطه ۱۰))، میزان مصرف واقعی آب صنعت و

- رابطه (۴) نشان‌دهنده مقدار انتقال آب در سال به سیستم است که برابر است با نرخ انتقال آب سالانه که در رابطه (۵) نشان داده شده است.
- $$AGW=AWW \quad (18)$$
- $$AWW=(AWCPH*CA*0.4) \quad (19)$$
- رابطه (۲۰) برابر است با مقدار مصرف واقعی آب کشاورزی که مقدار آن برابر مقدار آبی است که به‌طور واقعی در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (رابطه (۲۱) و رابطه (۲۲)).
- $$AAU=AAC \quad (20)$$
- $$AAC=(AWCPH*CA*0.6) \quad (21)$$
- $$AWCPH=7568 \quad (22)$$
- رابطه (۲۳) متغیر حالت سطح زیر کشت را نشان می‌دهد و مقدار آن برابر است با مقدار اولیه و مقداری که هر ساله این سطح کوچک می‌شود.
- $$CA = INTEG(SCA, 88000) \quad (23)$$
- رابطه (۲۴) مقدار کوچک شدن سطح زیر کشت را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر با نرخ کوچک شدن سطح زیر کشت (رابطه (۲۵)) است.
- $$SCA=SR \quad (24)$$
- $$SR=400 \quad (23)$$
- رابطه (۲۶) میزان مصرف واقعی آب در بخش صنعتی و خدماتی را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر است با میزان آبی که در بخش صنعت و خدمات به‌طور واقعی مصرف می‌شود (رابطه (۲۷)).
- $$AISU=ISAC \quad (26)$$
- $$ISAC=(ISS*ISWCP*0.8) \quad (27)$$
- رابطه (۲۸) میزان اتلاف آب صنعت و خدمات را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر با میزان اتلاف آب در بخش صنعتی و خدماتی (رابطه (۲۹)) است.
- $$ISW=ISWW \quad (28)$$
- $$ISWW=(ISS*ISWCP*0.2) \quad (29)$$
- $$ISWCP=429.36 \quad (30)$$
- رابطه (۳۱) نشان‌دهنده متغیر حالت تعداد مشترکان صنعتی و خدماتی است. جریان ورودی به این متغیر برابر است با تعداد مشترکان جدید و مقدار اولیه آن برابر است با 9084 مشترک.
- $$ISS=INTEG(NS, 9084) \quad (31)$$
- رابطه (۴) نشان‌دهنده مقدار انتقال آب در سال به سیستم است که برابر است با نرخ انتقال آب سالانه که در رابطه (۵) نشان داده شده است.
- $$STW=ATR \quad (4)$$
- $$ATR=315576 \quad (5)$$
- رابطه (۶) نشان‌دهنده مقدار آبی است که سالانه صرف مصرف آشامیدنی می‌شود. این مقدار برابر است با نرخ مصرف آب آشامیدنی هر نفر (رابطه (۷)) ضرب در جمعیت (رابطه (۱۳) و (۱۴)).
- $$DU=AWCP*POP \quad (6)$$
- $$AWCP=1.095 \quad (7)$$
- رابطه (۸) میزان اتلاف آب غیر آشامیدنی را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر است با مقدار آبی که در مصرف غیر آشامیدنی تلف می‌شود (رابطه (۹)).
- $$NDW=NWW \quad (8)$$
- $$NWW=(NWCP*POP*0.3) \quad (9)$$
- رابطه (۱۰) میزان مصرف واقعی غیر آشامیدنی آب توسط افراد را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر با میزان آبی است که به صورت واقعی توسط افراد مصرف می‌شود (رابطه (۱۱)).
- $$ANU=NAC \quad (10)$$
- $$NAC=(NWCP*POP*0.7) \quad (11)$$
- $$NWCP=138.53 \quad (12)$$
- رابطه (۱۳) متغیر حالت جمعیت را نشان می‌دهد که متغیر ورودی آن تولد (رابطه (۱۴)) و متغیر خروجی آن مرگومیر (رابطه (۱۶)) است.
- $$POP=INTEG(B-D, 287921) \quad (13)$$
- رابطه (۱۴) نشان‌دهنده تعداد تولد است که مقدار آن برابر با نرخ تولد (رابطه (۱۵)) است.
- $$B=BR \quad (14)$$
- $$BR=4550 \quad (15)$$
- رابطه (۱۶) نشان‌دهنده تعداد مرگومیر است که مقدار آن برابر با نرخ مرگومیر (رابطه (۱۷)) است.
- $$D=DR \quad (16)$$
- $$DR=913 \quad (17)$$
- رابطه (۱۸) نشان‌دهنده مقدار اتلاف آب کشاورزی است که مقدار آن برابر است با مقدار آبی که در بخش کشاورزی تلف می‌شود (رابطه (۱۹)).

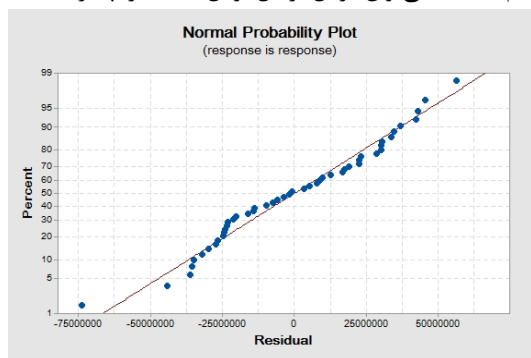
پس از جمع‌آوری حدود بالا و پایین از کارشناس به انجام تحلیل حساسیت پرداخته شد.

در شکل (۳) نمودار هیستوگرام مربوط به آزمایش‌های مرحله اول نشان داده شده است. در این نمودار محور عمودی نشان‌دهنده فراوانی داده‌ها و محور افقی نشان‌دهنده باقیمانده‌ها است. از این نمودار برای بررسی نرمال بودن داده‌ها استفاده می‌شود.



شکل ۳: نمودار هیستوگرام برای بررسی نرمال بودن داده‌های مرحله اول

در شکل (۴) نمودار احتمال باقیمانده برای مشاهدات مرحله اول نشان داده شده است. در این نمودار محور افقی باقیمانده‌ها و محور عمودی احتمال متناسب با هر باقیمانده را نشان می‌دهد. این نمودار توزیع تجمعی باقیمانده‌ها را روی کاغذ احتمال نرمال (کاغذ نموداری که محور عمودی آن به گونه‌ای درجه‌بندی شده است که توزیع تجمعی نرمال را به صورت یک خط مستقیم نشان می‌دهد) نشان می‌دهد. در تشخیص مستقیم بودن خط روی مقادیر مرکز نمودار نسبت به کران‌ها بیشتر تأکید می‌کنیم. در این شکل چون بیشتر نقاط حول خط مستقیم هستند می‌توان فرض نرمال بودن داده‌ها را پذیرفت.



شکل ۴: نمودار احتمال نرمال بودن باقیمانده‌های آزمایش مرحله اول  
در شکل (۵) نمودار بررسی استقلال مشاهدات مرحله اول نشان داده شده است. این نمودار باقیمانده‌ها را در مقابل ترتیب انجام آزمایش‌ها رسم می‌کند. در این نمودار همان‌طور که مشاهده می‌شود ترتیب مشاهدات هیچ‌گونه روند (مثبت یا منفی) مشخصی را نشان نمی‌دهد؛ و این بیانگر مستقل بودن مشاهدات از یکدیگر است.

رابطه (۳۲) نشان‌دهنده تعداد مشترکان جدید است و تعداد آن برابر با نرخ مشترکان جدید (رابطه (۳۳)) است.

$$NS=NSR \quad (32)$$

$$NSR=439 \quad (33)$$

رابطه (۳۴) عرضه آب به سیستم را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر است با میزان نفوذ در سفره‌های زیرزمینی (رابطه (۲)) و میزان انتقال سالانه آب (رابطه (۴)).

$$WS=P+STW \quad (34)$$

رابطه (۳۵) میزان تقاضای آب درون سیستم را نشان می‌دهد که مقدار آن برابر است با مصرف واقعی آب کشاورزی (رابطه (۲۰))، میزان آبی که صرف مصرف واقعی غیر آشامیدنی آب می‌شود (رابطه (۱۰))، میزان مصرف واقعی آب صنعت و خدمات (رابطه (۲۶))، میزان اتلاف آب در بخش کشاورزی (رابطه (۱۸))، میزان مصرف آب آشامیدنی در هرسال (رابطه (۶))، میزان اتلاف آب غیر آشامیدنی (رابطه (۸))، میزان اتلاف صنعت و خدمات (رابطه (۲۸)).

$$WD=AAU+ANU+AISU+AGW+DU+NDW+ISW \quad (35)$$

رابطه (۳۶) نشان‌دهنده تعادل بین میزان عرضه (رابطه (۳۴)) و تقاضا (رابطه (۳۵)) است. در این رابطه در صورت فزونی عرضه از تقاضا با مازاد آب و در صورت فزونی تقاضا بر عرضه آب با کمبود آب درون سیستم مواجه هستیم.

$$W WB=WS-WD \quad (36)$$

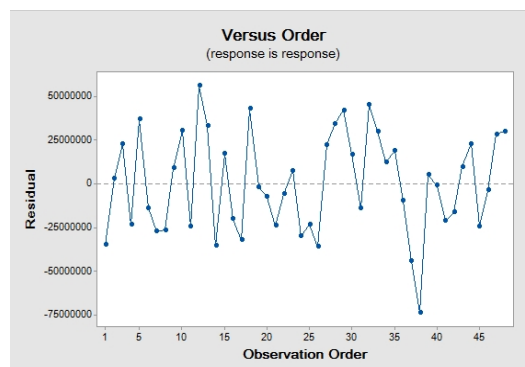
گام چهارم. تحلیل حساسیت متغیرها

در این گام حدود پایین و بالا برای تحلیل حساسیت متغیرها توسط کارشناس مشخص شده‌اند جدول (۲).

جدول ۲: مقادیر تعیین‌شده تحلیل حساسیت متغیرها

علامت اختصاری متغیر	واحد	وضعیت فعلی	حد پایین	حد بالا
PR	Cubic meter/Year	500 میلیون	450 میلیون	550 میلیون
ATR	Cubic meter/Year	315576	315576	500000
AWCP	Cubic meter/Year	1/095	1/04	1/14
BR	person/Year	4550	4300	5000
DR	person/Year	913	820	1000
SR	hectare/Year	400	320	480
NSR	subscriber/Year	439	415	460
NWCP	Cubic meter/Year	138/53	110	166
AWCPH	Cubic meter/Year	7568	5600	9500
ISWCP	Cubic meter/Year	429/36	390	470

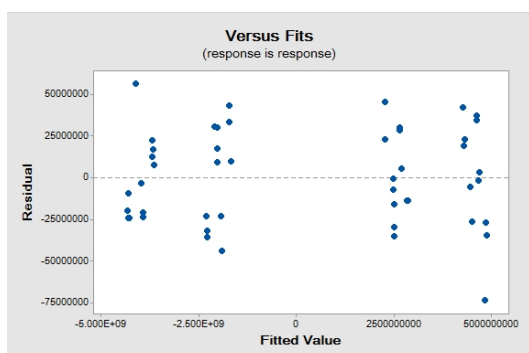
است؛ یعنی فرض  $H_0$  مبنی بر برابری واریانس‌ها رد می‌شود. همچنین نرخ مصرف آب هر واحد صنعتی و خدماتی (ISWCP) دارای مقدار  $(p=0.018)$  است و چون  $(p\text{-value}<0.05)$  است این متغیر هم معنادار است. متغیرهای نرخ انتقال آب سالیانه (ATR)، نرخ آب آشامیدنی هر نفر در سال (AWCP)، نرخ مشترکان جدید صنعت و خدمات (NSR) و نرخ مرگ‌ومیر (DR) با داشتن  $(p\text{-value}>0.05)$  معنادار نیستند.



شکل ۵: نمودار بررسی استقلال مشاهدات مرحله اول

در شکل (۶) نمودار بررسی ثابت بودن واریانس‌ها نشان داده شده است. محور افقی آن نمودار نشان‌دهنده مقادیر پیش‌بینی شده و محور عمود آن باقیمانده‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار بایستی به صورت متقارن باشد و نقاط حول محور آن به صورت یکنواخت پراکنده شده باشند. همان‌طور که در مشاهده می‌شود فرض ثابت بودن واریانس‌ها پذیرفته می‌شود.

در جدول (۳) به تجزیه و تحلیل واریانس متغیرها در آزمایش مرحله اول پرداخته شده است. در این جدول مقدار  $(p\text{-value})$  برای متغیرهای نرخ نفوذ (PR)، نرخ تولد (BR)، نرخ کاهش سطح زیر کشت (SR)، مقدار مصرف غیر آشامیدنی هر نفر (NWCP)، نرخ مصرف آب هر هکتار (AWCPH)، برابر صفر است. این بدین معنی است که تفاوت بین میانگین‌های این متغیرها به دلیل اینکه  $(p\text{-value}<0.05)$  معنادار



شکل ۶: نمودار بررسی ثابت بودن واریانس مشاهدات مرحله اول

در شکل (۷) و شکل (۸) نتیجه حاصل از ۴۸ آزمایش مرحله اول نشان داده شده است.

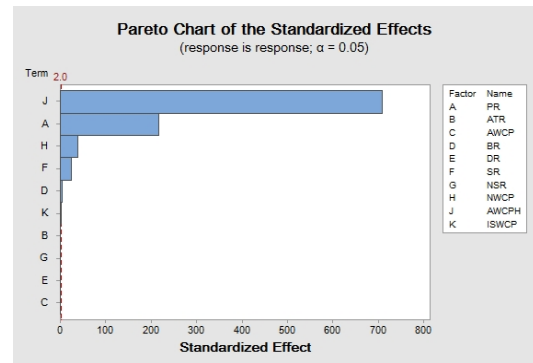
جدول ۳: جدول تحلیل واریانس آزمایش مرحله اول

P-Value	F-Value	Adj MS	Adj SS	Contribution	Seq SS	DF	Source
0	55083/62	5/68E+19	5/68E+20	99.99%	5/68E+20	10	Model
0	55083/62	5/68E+19	5/68E+20	99.99%	5/68E+20	10	Linear
0	46942/71	4/84E+19	4/84E+19	8.52%	4/84E+19	1	PR
0/27	1/26	1/30E+15	1/30E+15	0.00%	1/30E+15	1	ATR
0/822	0/05	5/28E+13	5/28E+13	0.00%	5/28E+13	1	AWCP
0	19/34	1/99E+16	1/99E+16	0.00%	1/99E+16	1	BR
0/432	0/63	6/52E+14	6/52E+14	0.00%	6/52E+14	1	DR
0	600/73	6/19E+17	6/19E+17	0.11%	6/19E+17	1	SR
0/363	0/85	8/76E+14	8/76E+14	0.00%	8/76E+14	1	NSR
0	1590.93	1/64E+18	1/64E+18	0.29%	1/64E+18	1	NWCP
0	501673/64	5/17E+20	5/17E+20	91.07%	5/17E+20	1	AWCPH
0/018	6/11	6/29E+15	6/29E+15	0.00%	6/29E+15	1	ISWCP
		1/03E+15	3/81E+16	0.01%	3/81E+16	37	Error
				100.00%	5/68E+20	47	Total

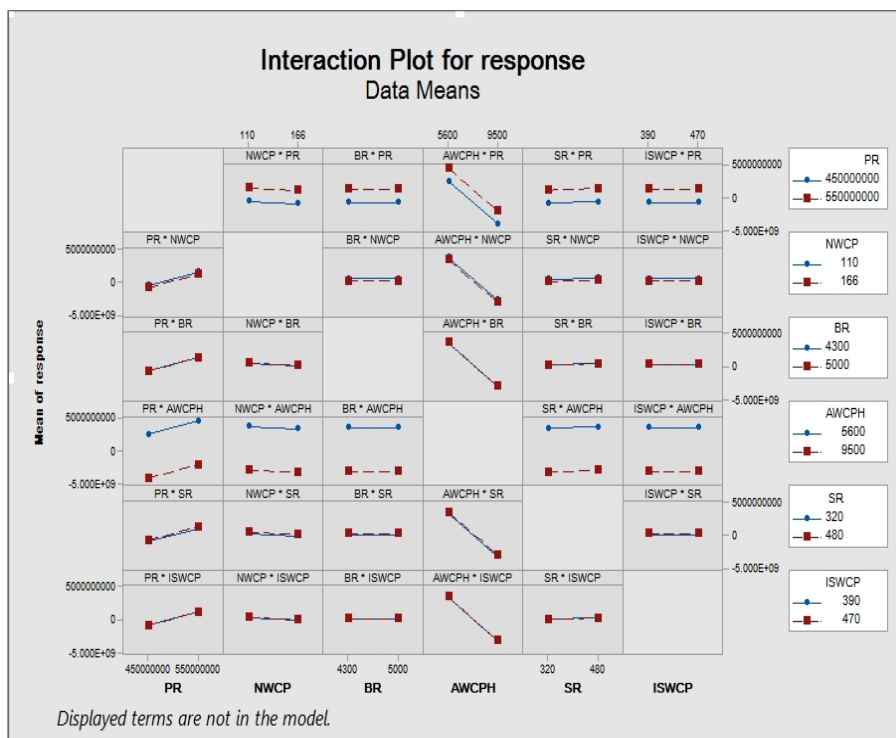
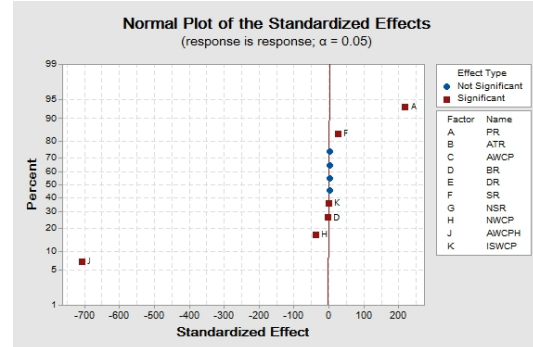
### شکل ۸: نمودار نرمال اثرهای استاندارد شده متغیرها

همان‌گونه که از شکل (۷) و شکل (۸) مشخص است. ۶ متغیر نرخ مصرف آب هر هکتار زیر کشت (WCH)، نرخ نفوذ در سفره زیرزمینی (PR)، نرخ تولد (BR)، نرخ کاهش سطح زیر کشت (CDR)، نرخ مصرف آب غیر آشامیدنی هر نفر در سال (NDCR)، نرخ مصرف آب هر مشترک صنعتی و خدماتی (WCS) به‌عنوان متغیرهای مهم سیستم کمبود آب شناسایی شده‌اند.

شکل (۹) اثر تعاملی متغیرهای حساس شناسایی شده در هم و همچنین اثر آن‌ها روی متغیر پاسخ را نشان می‌دهد. در این نمودار متغیرهای دارای شیب بیشتر اثر بیشتری بر متغیر پاسخ دارند؛ به‌عبارت‌دیگر شیب بیشتر برابر است با اثر بیشتر. همچنین شیب صعودی برای متغیرهایی است که اثر فزاینده دارند و شیب نزولی برای متغیرهایی است که اثر کاهنده دارند. به‌علاوه متغیرهای موازی اثر تعاملی خیلی کمی باهم دارند و متغیرهای غیر موازی اثر تعاملی خیلی زیادی باهم دارند.

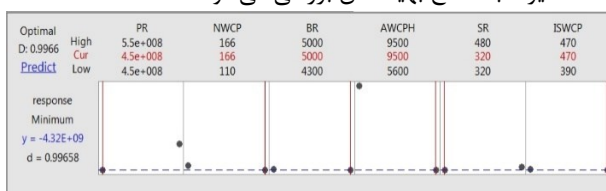


### شکل ۷: نمودار پارتوی آزمایش‌های انجام‌شده روی متغیرها



### شکل ۹: نمودار تعاملی اثر متغیرهای حساس در یکدیگر

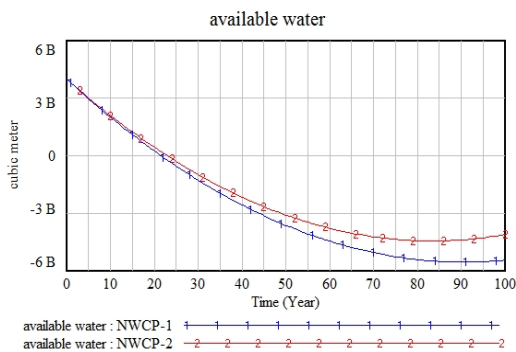
کار هم همه متغیرها وارد مدل می‌شوند و وضعیت سیستم با رسیدن همه متغیرها به سطح بهینه‌شان بررسی می‌شود.



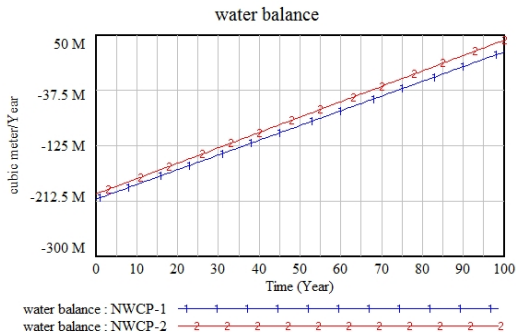
شکل (۱۰) نشان‌دهنده مقادیر بهینه هر متغیر است. در صورت رسیدن هر کدام از متغیرها به این سطح میزان آب‌های موجود به ۴۸۷۸۰۰۰۰۰ مترمکعب خواهد رسید. سناریوها مختلف بر اساس این مقادیر برای هر کدام از متغیرها تعریف می‌شوند. بدین صورت که ابتدا مقدار بهینه هر یک از این متغیرها را وارد نمودار حالت جریان کرده و سپس اثر آن در متغیر مربوط و متغیر پاسخ بررسی می‌شود. در آخر

#### ۲-۴- سناریوی دوم

شکل (۱۳) و شکل (۱۴) به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر مقدار فعلی و بهینه مصرف غیر آشامیدنی آب هر نفر در میزان آب‌های موجود میزان تعادل آب است. همان‌طور که از شکل (۱۳) مشخص است مصرف غیر آشامیدنی آب توسط هر نفر در کوتاه‌مدت تأثیر خیلی کمی در میزان آب‌های موجود دارد و در بلندمدت هم تأثیر نسبتاً کمندی در میزان آب‌های موجود دارد. از این‌رو تأثیر سیاست‌های مبتنی بر کاهش مصرف از سوی خانوارها در میزان آب‌های موجود چندان درخور توجه نیست؛ و بهتر است به سیاست‌های دیگر توجه بیشتری کرد؛ اما همان‌طور که از شکل (۱۴) مشخص است این سیاست‌ها تأثیر بهتری در تعادل آب دارند و برای کنترل کمبود آب نسبتاً تأثیر بهتری دارند.



شکل ۱۳: نمودار تأثیر میزان بهینه و فعلی مصرف غیر آشامیدنی آب هر نفر در میزان آب‌های موجود



شکل ۱۴: نمودار تأثیر میزان بهینه مصرف غیر آشامیدنی هر نفر در تعادل آب

#### ۳-۴- سناریوی سوم

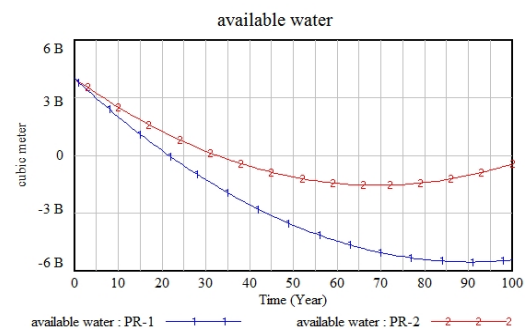
شکل (۱۵) و شکل (۱۶) به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر میزان مصرف آب هر هکتار زمین کشاورزی در حالت فعلی و بهینه در میزان آب‌ها موجود و تعادل آب است. همان‌طور که از شکل (۱۵) و شکل (۱۶) مشخص است، میزان مصرف هر هکتار زمین کشاورزی تأثیر بسیار زیادی در میزان آب‌های موجود و میزان تعادل (کمبود آب) دارد. با توجه به نمودارهای این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت بهترین سیاست‌ها در زمینه مدیریت بحران کمبود آب در این حوضه آبریز مربوط به بخش کشاورزی و اصلاح این بخش هستند. از این‌رو توصیه می‌شود برای مدیریت بهتر بحران آب فعالیت‌هایی از جمله اصلاح

#### شکل ۱۰: میزان بهینه متغیرها و مقدار بهینه متغیر پاسخ

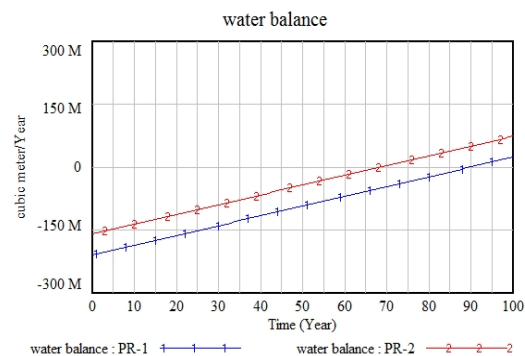
در ادامه گام پنجم بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده از شکل (۱۰) به مقایسه وضعیت فعلی و بهینه متغیرها پرداخته می‌شود و راهکارهایی جهت رسیدن به وضعیت بهینه متغیرها ارائه می‌شود.

#### ۱-۴- سناریوی اول

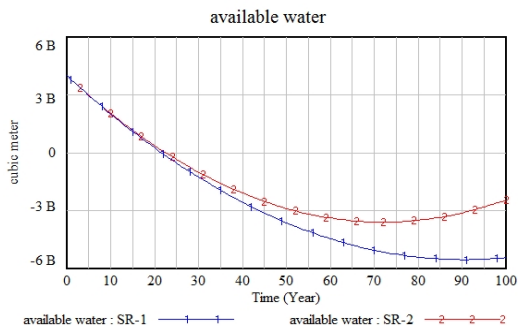
شکل (۱۱) و شکل (۱۲) به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر نرخ نفوذ بهینه در مقدار آب‌های موجود و میزان تعادل آب است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است نفوذ آب به سفره‌های زیرزمینی در کوتاه‌مدت خیلی زیاد نیست. ولی در بلندمدت می‌تواند تأثیر آن رفته‌رفته زیاد می‌شود و می‌تواند بحران کمبود آب‌های زیرزمینی را برای ۱۰ تا ۱۵ سال به تأخیر بیندازد (زمان رسیدن مقدار آب‌های موجود به صفر را از حدود ۲۰ سال به حدود ۳۰ تا ۳۵ سال به تأخیر بیندازد). همچنین باید متوجه بود این متغیر تحت تأثیر بارندگی‌های سالانه و آب‌های روان قرار دارد و تنها راه رسیدن به این سطح بهینه می‌تواند بارور کردن ابرها برای بارش مصنوعی و نفوذ مصنوعی به درون سفره‌ها باشد و نیازمند صرف هزینه‌های زیاد هستند. از طرفی نفوذ با همین نرخ بهینه می‌تواند در رسیدن به مازاد آب را برای حوضه آبریز بین ۲۰ تا ۲۵ سال به جلو بیندازد (زمان رسیدن به مازاد آب یعنی پیشی گرفتن نیروهای عرضه از نیروهای تقاضا از حدود ۹۰ سال به حدود ۶۷ سال کاهش می‌یابد).



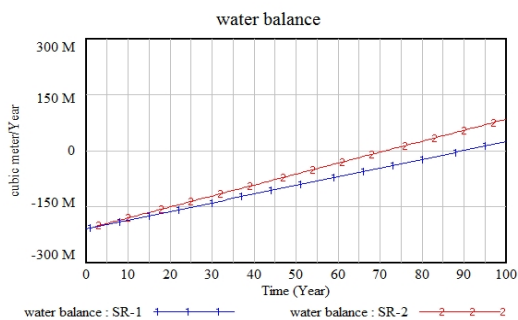
شکل ۱۱: نمودار تأثیر مقدار بهینه نفوذ در سفره‌های زیرزمینی در مقدار آب‌های موجود



شکل ۱۲: نمودار تأثیر مقدار بهینه نفوذ در سفره‌های زیرزمینی در میزان تعادل آب



شکل ۱۷: نمودار تأثیر میزان بهینه کاهش سطح زیر کشت در میزان آب‌های موجود

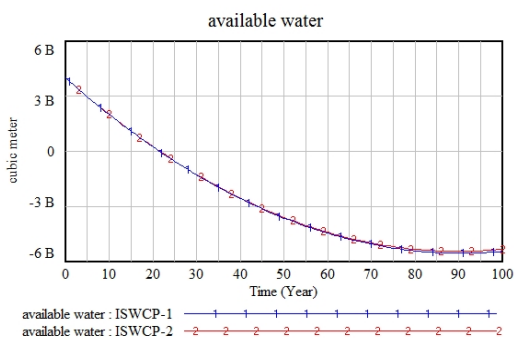


شکل ۱۸: نمودار تأثیر میزان بهینه کاهش سطح زیر کشت در میزان تعادل آب

#### ۴-۵- سناریوی پنجم

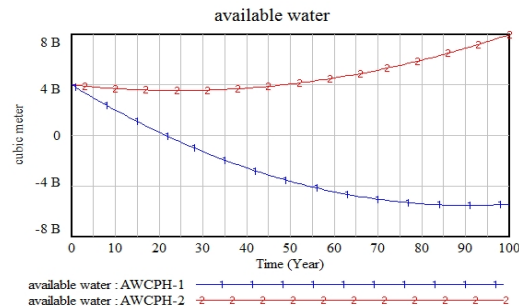
شکل (۱۹) و شکل (۲۰) به ترتیب نشان‌دهنده میزان تأثیر مصرف فعلی و بهینه آب صنعت و خدمات در مقدار آب‌های موجود و تعادل آب است. همان‌طور که از نمودارهای شکل (۱۹) و شکل (۲۰) مشخص است نرخ مصرف آب توسط بخش‌های خدماتی و صنعتی تأثیر محسوسی در میزان آب‌های موجود و میزان تعادل آب ندارد. از جمله دلایل این موضوع می‌تواند موارد زیر باشد:

۱. واحدهای صنعتی و خدماتی در برخی مواقع سال تعطیل هستند و مصرف آبی هم ندارند مثل مدارس، دانشگاه‌ها و غیره؛
۲. واحدهای صنعتی و خدماتی نسبت به مسئله کارایی و اثربخشی یا به‌طور کلی بهره‌وری توجه بیشتری دارند؛
۳. واحدهای صنعتی و خدماتی سرمایه‌بهتری برای به‌روزرسانی تجهیزات مصرف آب و استفاده از امکاناتی دارند که آب کمتری مصرف می‌کنند.

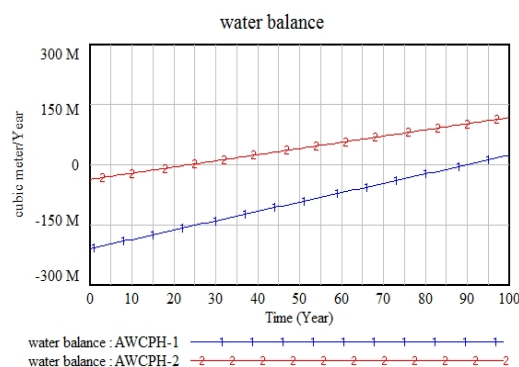


شکل ۱۹: نمودار تأثیر نرخ بهینه مصرف آب هر مشترک صنعتی و

شبکه‌های آبیاری، تغییر شیوه کشت، کاشت محصولاتی که به آب کمی نیاز دارند، اصلاح بذر و سایر فعالیت‌هایی که به کاهش مصرف آب در یک هکتار منجر می‌شود توجه زیادی شود.



شکل ۱۵: نمودار تأثیر میزان مصرف بهینه آب هر هکتار در میزان آب‌های موجود



شکل ۱۶: نمودار میزان تأثیر میزان مصرف آب هر هکتار در میزان تعادل آب

#### ۴-۴- سناریوی چهارم

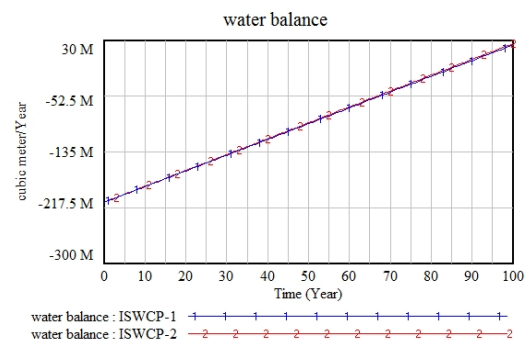
شکل (۱۷) و شکل (۱۸) به ترتیب نشان‌دهنده نمودار تأثیر میزان بهینه کاهش سطح زیر کشت در میزان آب‌های موجود و نمودار تأثیر میزان بهینه کاهش سطح زیر کشت در میزان تعادل آب است. همان‌گونه که از شکل (۱۷) و شکل (۱۸) مشخص است. کاهش سطح زیر کشت تأثیر محسوسی در میزان آب‌های موجود و تعادل آب ندارد؛ زیرا تأثیر آن ابتدا باید بر روی سطح زیر کشت اعمال شود و سپس بر روی مصرف آب و این فرایند نیازمند گذشت زمان است. برای همین تأثیر آن ابتدا چندان مشخص نیست ولی همین‌که دوره زمانی طولانی‌تر می‌شود تأثیر آن هم کم‌کم افزایش می‌یابد و در زمان خیلی طولانی تأثیر زیادی را نشان می‌دهد. از این می‌توان نتیجه گرفت برای مدیریت بحران آب نباید انتظار زیادی از این متغیر داشت.

آب مورد نیاز انسان به ویژه در مناطق خشک و کم آب است. آب‌های زیر زمینی تحت تاثیر خشکسالی‌های کوتاه مدت قرار نمی‌گیرد و چنانچه به درستی استفاده شود منبع مطمئنی برای رفع نیاز انسان است. از طرفی با توجه به افت شدید سطح آب زیر زمینی و فرو نشستن خاک بخشی از مشکلات ایجاد شده در منطقه رفسنجان می‌باشد. لذا در این تحقیق با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها به شبیه‌سازی بحران کمبود آب در شهر رفسنجان پرداخته شد و بر اساس اطلاعات بدست آمده برای مدیریت بهتر منابع آب و مسأله مرتبط با آن به تدوین سناریوهایی پرداخته شد. از بین تمام سناریوها بیان شده می‌توان از سناریوی کاهش مصرف آب در هکتار سطح زیر کشت به عنوان بهترین سناریو نام برد. از این رو بهترین راه‌حل برای جلوگیری از وقوع بحران آب در شهرستان رفسنجان توجه به مسئله کشاورزی و اصلاح فعالیت‌های آن است. از آنجایی که در این پژوهش بحران کمبود آب در شهر رفسنجان شبیه‌سازی شد و به تحلیل حساسیت آن‌ها بر اساس مقادیر کمی پرداخته شد. می‌توان با قرار دادن این اعداد و ارقام در اختیار سازمان‌های ذی‌ربط مانند آب منطقه‌ای و آب و فاضلاب به جهت‌گیری بهتر و بهبود تصمیم‌های آتی آن‌ها کمک نمود.

## مراجع

- [1] X. Xi and K. L. Poh, "Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore," *Procedia Comput Sci*, vol. 16, pp. 157-166, 2013.
- [2] T. Kojiri, T. Hori, J. Nakatsuka, and T. S. Chong, "World continental modeling for water resources using system dynamics," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 33, no. 5, pp. 304-311, 2008.
- [3] Y. Sun, N. Liu, J. Shang, and J. Zhang, "Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model," *J Clean Prod*, vol. 142, pp. 613-625, 2017.
- [4] X. H. Zhang, H. W. Zhang, B. Chen, G. Q. Chen, and X. H. Zhao, "Water resources planning based on complex system dynamics: a case study of Tianjin city," *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*, vol. 13, no. 10, pp. 2328-2336, 2008.
- [5] K. Madani, A. AghaKouchak, and A. Mirchi, "Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation," *Iranian studies*, vol. 49, no. 6, pp. 997-1016, 2016.
- [6] J. Sterman, "System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world," *Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division*, 2002.
- [7] H. C. Guo, L. Liu, G. H. Huang, G. A. Fuller, R. Zou, and Y. Y. Yin, "A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin," *J Environ Manage*, vol. 61, no. 1, pp. 93-111, 2001.
- [8] C. C. Ho, C. C. Yang, L. C. Chang, and T. W. Chen, "The application of system dynamics modeling to study impact of water resources planning and management in Taiwan," in *Proc., 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, 2005, pp. 17-21.
- [9] L. H. Feng, X. C. Zhang, and G. Y. Luo, "Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in Yiwu City, China," *Math Comput Simul*, vol. 79, no. 3, pp. 269-278, 2008.
- [10] L. I. Cheng, "System dynamics model of Suzhou water resources carrying capacity and its application," *Water Science and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 144-155, 2010.
- [11] S. Wei, H. Yang, J. Song, K. C. Abbaspour, and Z. Xu, "System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China," *Eur J Oper Res*, vol. 22, no. 1, pp. 248-262, 2012.

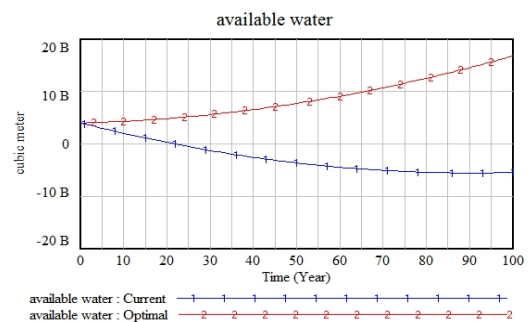
## خدماتی در میزان آب‌های موجود



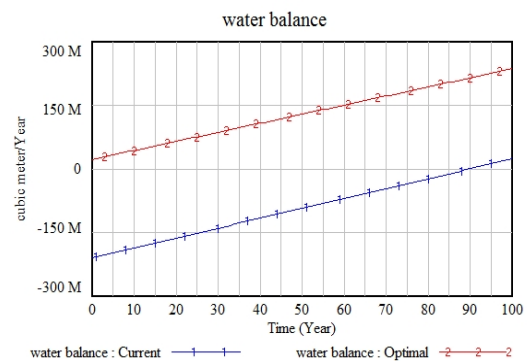
شکل ۲۰: نمودار تأثیر نرخ مصرف بهینه هر مشترک صنعتی و خدماتی در میزان تعادل آب

## ۴-۶- وضعیت سیستم در بهینگی همه متغیرها

شکل (۲۱) و شکل (۲۲) وضعیتی را نشان می‌دهد که همه متغیرها در مقدار بهینه خود باشند. همان‌طور که از نمودار پیداست به‌کارگیری هم‌زمان همه سیاست‌ها می‌تواند از بروز بحران آب برای همیشه جلوگیری کند؛ اما رسیدن به این سطح نیاز به هزینه، فعالیت‌ها و زمان زیادی دارد. این سیاست‌ها موجب پیشی گرفت نیروهای عرض از نیروهای تقاضای آب می‌شوند و این به حفظ میزان آب‌های موجود و افزایش سالانه این مقدار می‌انجامد.



شکل ۲۱: وضعیت آب‌های موجود در زمان بهینگی همه متغیرها



شکل ۲۲: وضعیت تعادل آب در بهینگی همه متغیرها

## ۵. نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط کشور از نظر اقلیمی و ژئو پلوتیک همواره امکان بروز بحران آب در کشور وجود دارد. آب‌هاب زیر زمینی یکی از منابع تأمین

- [12] S. Wang, L. Xu, F. Yang, and H. Wang, "Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model," *Science of the Total Environment*, vol. 472, pp. 1070–1081, 2014.
- [13] J. A. Duran-Encalada, A. Paucar-Caceres, E. R. Bandala, and G. H. Wright, "The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region," *Eur J Oper Res*, vol. 256, no. 2, pp. 567–581, 2017.
- [14] D. C. Montgomery, "Montgomery Design and Analysis of Experiments Eighth Edition," *Arizona State University*, p. Copyright, 2009(2005), 2001., 2013.