

# ارزیابی طرحهای توسعه منابع آب در سیستم چندمخزنه زیرحوضه دره رود با استفاده از شاخصهای عملکردی

مجید شفیعی جود<sup>۱</sup>

احمد ابریشمچی<sup>۲</sup>

عبدالرحیم صولی تبار<sup>۳</sup>

(دریافت ۹۰/۵/۱ پذیرش ۹۱/۲/۹)

## چکیده

شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب ابزاری کارآمد در ارزیابی گزینه‌های مختلف و تصمیم‌سازی در شرایط توسعه است. حوضه آبریز رودخانه ارس در شرایط توسعه با افزایش شدید نیاز آبی مواجه است که برای این منظور احداث چند سد در دست مطالعه است. در این مطالعه از روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس استفاده شد. سپس، برای ارزیابی سیاست‌های مطرح شده از شاخصهای عملکردی استفاده شد. سه شاخص استفاده شده در این مطالعه اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری بودند که در محاسبه شاخصهای برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری از دو تعریف برآورد مبتنی بر میانگین و برآورد مبتنی بر مقدار بیشینه استفاده شد. نتایج مقایسه شاخصها با تعاریف مختلف نشان داد اگرچه استفاده از برآوردگرهای مبتنی بر بیشینه مقدار در مطالعات گذشته توصیه شده است، اما برآوردگرهای مبتنی بر میانگین به دلیل در نظر گرفتن وضعیت سیستم در شرایط مختلف، حاوی اطلاعات مفیدتری هستند. بهره‌گیری از این شاخصها در کنار نتایج مدل‌سازی علاوه بر اطلاعات سودمندی که برای تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان دارد، امکان پیش‌بینی وضعیت سیستم در شرایط شکست را نیز فراهم می‌آورد.

**واژه های کلیدی:** پویایی سیستم، شاخصهای عملکردی، اعتمادپذیری، برگشت پذیری، آسیب‌پذیری، ارزیابی طرحهای توسعه آبی، زیرحوضه دره رود

## Evaluation of Water Resources Development Plans in Multi-Reservoir Darehrood Sub catchment System Using Performance Indices

Majid Shafiee Jood<sup>1</sup>

Ahmad Abrishamchi<sup>2</sup>

Abdolrahim Salavitabar<sup>3</sup>

(Received July 23, 2011 Accepted Apr. 28, 2012)

### Abstract

Water resources systems simulation is a helpful tool in evaluating proposed scenarios and decision making in the development condition. Aras river basin will be facing increasing water demand in the development condition; hence, construction of new reservoirs is under study. In this study, System Dynamics approach was used to simulate the Darehrood sub catchment water resources system in Aras river basin. Then, performance indices were used to evaluate the proposed scenarios. Reliability, resiliency and vulnerability were the three performance indices presented in study where maximum value and mean value estimators mentioned in the previous studies were used to estimate resiliency and vulnerability indices. The results showed that although using maximum value estimators have been proposed in some previous studies, mean value estimators provide more useful information since they consider system performance in different states. Using these indices together with the results obtained from simulation model, can provide managers and decision makers with useful knowledge of system performance and help them to predict the behavior of the system once a failure in the system has occurred

**Keywords:** System Dynamics, Performance Indices, Reliability, Resiliency, Vulnerability, Evaluating Water Development Plans, Darehrood Sub Catchment.

1. Ph.D. Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., University of Illinois at Urbana Champaign, IL, USA (Corresponding Author) shafiee2@illinois.edu  
2. Prof., Dept. of Civil Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran  
3. Head of Water Resources Department, Mahab Ghodss Consulting Engineers Co., Tehran

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه ایلینوی، آمریکا  
(نویسنده مسئول) shafiee2@illinois.edu

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران  
۳- مدیر بخش منابع و مصارف آب، مهندسین مشاور مهتاب قدس، تهران

یکی از راههای غلبه بر مشکل کمبود منابع آب و کمک به توسعه پایدار در سیستم‌های منابع آب، ارزیابی سیاست‌های مدیریتی و کمک به تصمیم‌سازی در سطوح کلان است. یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آب ارزیابی و تصمیم‌گیری بر مبنای کل سیستم به جای رویکرد محدود تک مخزنی است که این امر مستلزم داشتن چشم‌اندازی یکپارچه از سیستم مورد نظر است. در دهه‌های اخیر استفاده از روشهای مختلف تحلیل سیستم هم در زمینه شبیه‌سازی و هم در زمینه بهینه‌سازی به عنوان یک ابزار کارآمد در مدیریت منابع آب نقش ویژه‌ای در غلبه بر چالشهای این حوزه داشته است [۱].

استفاده از روشهای بهینه‌سازی در حل مسائل مدیریت منابع آب و به‌ویژه بهره‌برداری بهینه از مخازن، جایگاه بارزی در مطالعات گذشته داشته به‌گونه‌ای که مدل‌های مختلفی در سیر تکامل روشهای بهینه‌سازی در این حوزه توسعه داده شده‌اند [۲-۴]. اما آنچه سبب ارزیابی دقیق و اعمال مناسب تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در یک سیستم می‌شود، شبیه‌سازی مناسب سیستم مورد نظر است. علیرغم توسعه و استفاده زیاد از روشهای بهینه‌سازی، توسعه یک مدل شبیه‌سازی که در کنار نمایش صحیح و کارآمد از یک سیستم پیچیده و پویا، قابلیت اعمال سیاست‌های مختلف تصمیم‌گیری در مدل را نیز داشته باشد همواره مورد تحقیق بسیاری از افراد در حوزه‌های مختلف به‌ویژه تحلیل سیستم‌ها بوده است [۵-۸].

در روشهای بهینه‌سازی، اثر اعمال سیاست‌های مختلف بر عملکرد سیستم منابع آب مورد نظر با توجه به توابع هدف و مجموعه نقاط جواب قابل ارزیابی است؛ این در حالی است که در روشهای شبیه‌سازی باید نتایج حاصل از اعمال سیاست‌های مختلف را به‌گونه‌ای که امکان انتخاب سیاست بهتر فراهم شود، تفسیر کرد. یکی از روشهایی که برای ارزیابی سیاست‌های اعمال شده بر یک سیستم مطرح می‌شود استفاده از شاخصهای عملکردی است. هاشیموتو و همکاران در سال ۱۹۸۲، اعتمادپذیری<sup>۱</sup>، برگشت‌پذیری<sup>۲</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۳</sup> را به عنوان سه شاخص مهم در ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب معرفی کرده و از آنها برای ارزیابی سیاست‌های مختلف بهره‌برداری از یک مخزن با نیاز مشخص استفاده کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در صورت استفاده از قاعده هجینگ<sup>۴</sup> اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری سیستم کاهش می‌یابد. کاهش اعتمادپذیری تأثیر منفی در عملکرد سیستم دارد اما کاهش آسیب‌پذیری شدت شکست احتمالی سیستم را در درازمدت

کاهش می‌دهد [۹]. سرجویک و ابرادوویچ در سال ۱۹۹۵ برای اولین بار از اعتمادپذیری در ارزیابی استراتژی‌های کنترلی برای سیستم‌های چندمخزنی منابع آب استفاده کردند. در این مطالعه اگرچه تعریف مشابهی با مطالعه هاشیموتو و همکاران در سال ۱۹۸۲ برای تعیین اعتمادپذیری ارائه داده‌اند اما تأثیر هجینگ را در کاهش اعتمادپذیری حذف نموده‌اند؛ به این معنی که اگر تأمین درصد خاصی از نیاز و نه لزوماً همه آن هم به‌عنوان یک شرایط مطلوب محسوب شود، اعتمادپذیری کاهش نمی‌یابد. به این منظور برای تشخیص وضعیت سیستم از یک مقدار آستانه استفاده شده است [۱۰]. سیمونوویچ و لی در سال ۲۰۰۳ پس از توسعه یک مدل شبیه‌سازی بر پایه پویایی سیستم برای یک سیستم پیچیده کنترل سیل، از اعتمادپذیری در ارزیابی عملکرد اجزای سیستم در اثر اعمال سناریوهای مختلف تغییر اقلیم استفاده کردند [۱۱]. اگرچه در مطالعات گذشته اغلب از شاخصهای عملکردی بر اساس تعریفی هاشیموتو و همکاران استفاده شده است، اما در برخی از مطالعات تعاریف متفاوتی برای این شاخصها ارائه شده است. در این مطالعات به‌جای استفاده از مقادیر میانگین در برآورد برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، از مقدار بیشینه استفاده شده است [۱۲]. اگرچه تعاریف ارائه شده از شاخصها در هر دو گروه یکسان است، اما تفاوت در برآورد کننده‌ها در ارزیابی نتایج مؤثر خواهد بود. کاندزوویچ و کیندلر در سال ۱۹۹۵ و جلدسن و رزبجرگ در سال ۲۰۰۴ در مطالعات خود از نظر آماری به نحوه انتخاب و استفاده از این شاخصها پرداخته‌اند [۱۳ و ۱۴]. این در حالی است که استفاده از مقدار بیشینه در برآورد شاخصها می‌تواند تحت تأثیر شرایط حدی (خشکسالی) قرار گیرد.

در این مطالعه ابتدا هر دو گروه از شاخصهای عملکردی معرفی شدند و سپس شبیه‌سازی به‌روش پویایی سیستم شرح داده شد. در ادامه سیستم منابع آب چندمخزنی زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس معرفی شد و نحوه رویکرد به مسئله بیان گردید. در انتها نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ارزیابی سناریوهای مختلف با استفاده از شاخصهای عملکردی آورده شد و اختلاف میان دو گروه شاخص عملکردی در ارزیابی سیستم مورد نظر بیان شد.

## ۲- روش انجام تحقیق

### ۲-۱- شاخصهای عملکردی

از شاخصهای عملکردی در ارزیابی عملکرد سیستم‌ها تحت سیاست‌های مختلف استفاده می‌شود. این شاخصها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ شاخصهای عملکردی سنتی<sup>۵</sup> و شاخصهای

<sup>۱</sup> Reliability

<sup>۲</sup> Resiliency

<sup>۳</sup> Vulnerability

<sup>۴</sup> Hedging

<sup>۵</sup> Traditional Performance Indices (TPI)



بیشینه دوره شکست ( $d_j$ ) در برآورد برگشت پذیری (رابطه ۷)، از صدک  $p$ ام<sup>۱</sup> در نمودار تابع توزیع تجمعی<sup>۲</sup> که به داده‌های دوره شکست ( $d_j$ ) برازش داده می‌شود، استفاده کرده‌اند [۱۴]. اگر  $F_d$  تابع توزیع تجمعی دوره شکست باشد، صدک  $p$ ام برابر است با  $F_d^{-1}(p)$  و برگشت پذیری طبق این تعریف عبارت است از

$$Res = \{F_d^{-1}(p)\}^{-1} \quad (۸)$$

### ۲-۱-۳- آسیب پذیری

این شاخص معیاری است برای تعیین خسارت‌های احتمالی وارده بر سیستم ناشی از یک رویداد شکست. هاشیموتو و همکاران در سال ۱۹۸۲ این شاخص را به صورت زیر تعریف کرده‌اند [۹]

$$Vul = \sum_{j \in F} e(j)h(j) \quad (۹)$$

که در این رابطه

$h(j)$  شدیدترین خسارتی است که در  $j$  آمین گذار در وضعیت شکست به وجود می‌آید و  $e(j)$  احتمال این است که  $h(j)$  شدیدترین خسارت در میان همه وضعیت‌های شکست باشد. هاشیموتو و همکاران در سال ۱۹۸۲ شاخص آسیب‌پذیری را بر اساس کل کمبودی که در  $j$  آمین گذار در وضعیت شکست ایجاد می‌شود برآورد کرده‌اند ( $v_j$ ) و احتمال اینکه هر رویداد شدیدترین شکست باشد را برای همه رویدادها یکسان و برابر با  $\frac{1}{M}$  در نظر گرفته‌اند. با توجه به توضیحات بالا، در این مطالعه، شاخص آسیب‌پذیری به عنوان میانگین کمبودها در دوره‌های شکست برآورد می‌شود

$$Vul = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M v(j) \quad (۱۰)$$

مشابه شاخص برگشت‌پذیری، موی و همکاران در سال ۱۹۸۶ به جای استفاده از میانگین در برآورد شاخص آسیب‌پذیری از بیشینه مقدار استفاده کرده‌اند [۱۲]

$$Vul = \max \{v(j)\} \quad (۱۱)$$

همچنین جلدسن و رزبجرگ در سال ۲۰۰۴ از صدک  $p$ ام تابع توزیع تجمعی که به داده‌های حجم کمبود در هر دوره شکست  $v_j$  برازش داده شود به عنوان برآورد کننده شاخص آسیب‌پذیری استفاده کرده‌اند [۱۴]

$$Vul = F_v^{-1}(p) \quad (۱۲)$$

بنابر آنچه در برخی مطالعات پیشین آمده است، استفاده از برآوردگری از شاخص‌ها که رفتار یکنوایی نسبت به تغییرات حجم ذخیره مخزن و میزان برداشت آب داشته باشد پیشنهاد می‌شود [۱۳ و ۱۴]. جلدسن و رزبجرگ در سال ۲۰۰۴ نشان داده‌اند که شاخص‌های بر اساس تعریف موی و همکاران در سال ۱۹۸۶، نسبت به تغییرات بیشینه ذخیره مخزن و برداشت آب رفتار یکنوایی از خود نشان می‌دهند در حالی که این تغییرات در شاخص‌های بر اساس تعریف هاشیموتو و همکاران در سال ۱۹۸۲، رفتار یکنوایی ندارند. از اینرو این مطالعه برآوردگرهایی که بیشینه مقدار را در نظر می‌گیرند در برابر برآوردگرهایی که مقدار میانگین را در نظر می‌گیرند پیشنهاد داد.

### ۲-۲- پویایی سیستم<sup>۳</sup>

در این مطالعه برای شبیه‌سازی سیستم منابع زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس از روش پویایی سیستم استفاده شد. پویایی سیستم یک ابزار مدیریتی برای تصمیم‌گیری در مورد سیستم‌های پویا است که با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، امکان شبیه‌سازی، فهم و درک سیستم‌های پیچیده را فراهم می‌کند، به عبارت دیگر روشی برای فهم رفتار پویا و مستمر در سیستم‌های پیچیده به شمار می‌رود. این روش اولین بار توسط فورستر<sup>۴</sup> مطرح شد [۱۶]. پویایی سیستم بر پایه دو رکن اساسی بنا نهاده شده است، رکن اول توجه به عامل زمان است به گونه‌ای که رفتار سیستم در طول زمان مورد بررسی قرار گیرد. رکن دوم توجه به پسخوران<sup>۵</sup> در هر سیستم است [۱۷].

پتانسیل استفاده از روش پویایی سیستم در منابع آب برای اولین بار در دهه ۹۰ میلادی توسط لی<sup>۶</sup> مطرح شد. وی تأکید کرد که مدل‌سازی در هیدرولوژی در دو مرحله مفهوم‌سازی و برنامه‌نویسی مدل صورت می‌گیرد که این دو مرحله به خوبی در ساختار پویایی سیستم نمایش داده می‌شوند [۱۸].

پویایی سیستم در منابع آب در سه حوزه مدیریت منابع آب، مدل‌سازی اکولوژیکی و زیست محیطی و مدل‌سازی حوضه‌ای به کار برده می‌شود [۱۹]. احمد و سیمونوویچ در سال ۲۰۰۰ از این روش در زمینه مدیریت و بهره‌برداری از مخزن استفاده کرده و این روش مدل‌سازی را جایگزین مناسبی برای مدل‌های سنتی که در مدیریت سیل استفاده می‌شد، دانسته‌اند این دو همچنین بر این باوراند که مدل‌های SD قابلیت مناسبی در اعمال تحلیل حساسیت

<sup>3</sup> System Dynamics (SD)

<sup>4</sup> Forrester

<sup>5</sup> feedback

<sup>6</sup> Lee

<sup>1</sup>  $p^{\text{th}}$  percentile

<sup>2</sup> Cumulative Distribution Function (CDF)

داشته و نقش موثری در کاهش مدت زمان مدل‌سازی دارند [۸]. سیمونویچ و لی در سال ۲۰۰۳ مدل‌هایی با استفاده از SD برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر روی سیستم‌های بزرگ مقیاس کنترل سیل توسعه دادند. این مطالعه نشان داد که می‌توان با مدل‌سازی SD، GCMها را با هر مدل هیدرولوژیکی ترکیب کرد [۱۱]. در تحقیقی مشابه، لی و همکاران در سال ۲۰۱۰ تأثیرات سناریوهای تغییر اقلیم را در بهره‌برداری از مخزن در یک مدل SD مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۰]. گلیان و همکاران در سال ۱۳۸۶ مدل سیستم منابع آب رودخانه آبی چای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را به روش SD توسعه داده و اثر سیاست‌های مختلف را بر روی حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه بررسی کرده‌اند. در این مطالعه از تغییرات حجم آب ورودی به دریاچه به‌عنوان عاملی در ارزیابی سیاست‌ها استفاده شده است [۷]. این مطالعات و مطالعات زیاد دیگری که در این زمینه انجام شده است نشان می‌دهد دلیل اصلی استفاده از SD، قابلیت اجرای دو و چندباره مدل با استفاده از ویژگی‌های گرافیکی مدل‌های SD است که سبب می‌شود ذینفعان همراه با مدل در فرایند پس‌خوران شرکت کرده و راه‌حل‌های مناسبی برای مشکلات مختلف مدیریتی فراهم کنند [۲۱].

در روش پویایی سیستم، متغیرها به دو گروه عمده حالت و نرخ تقسیم می‌شوند. متغیر حالت جزء اصلی هر سیستم است به‌طوری که هدف اصلی شبیه‌سازی، شناخت رفتار و نحوه تغییرات این متغیر در طول زمان است. آنچه سبب ایجاد تغییرات در متغیر حالت می‌شود، متغیرهای نرخ مرتبط با آن است. علاوه بر این دو متغیر، از متغیرهای کمکی برای اعمال روابط ریاضی مورد نظر و ارتباط بین اجزای سیستم استفاده می‌شود. در این روش شبیه‌سازی، تغییرات و رفتار متغیر حالت مورد نظر با استفاده از حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر روابط بین اجزای سیستم صورت می‌گیرد [۱۷].

استفاده از روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی هر سیستم دلخواه در سه مرحله صورت می‌پذیرد؛ در مرحله اول باید اجزای سازنده سیستم و تعامل بین آنها در قالب ساختارهای علی-معلولی<sup>۱</sup> تعیین گردد. در این قسمت بهتر است پس از تعیین متغیرهای حالت در سیستم مورد نظر، عوامل تاثیرگذار بر آنها و نحوه تاثیرگذاری آنها مشخص شود. در شکل ۱، یک ساختار علت و معلولی ساده از یک سیستم منابع آب (مخزن یک سد) نشان داده شده است. در مرحله دوم پس از تعیین متغیرهای حالت، متغیرهای نرخ و متغیرهای کمکی، نمودار ذخیره - جریان<sup>۲</sup> برای ساختار علی-معلولی مورد نظر رسم می‌شود. برای ساختار نشان داده شده در شکل ۱، "حجم ذخیره

آب در مخزن سد"<sup>۳</sup> به‌عنوان متغیر حالت است. "حجم بارش ورودی به مخزن"<sup>۴</sup>، "جریان آب ورودی به مخزن"<sup>۵</sup>، "هدررفت از مخزن سد"<sup>۶</sup>، "سرریز از مخزن"<sup>۷</sup> و "جریان خروجی تنظیم شده"<sup>۸</sup> به‌عنوان متغیرهای نرخ هستند. لازم به‌ذکر است از آوردن برخی متغیرهای کمکی صرف‌نظر شده است. نمودار ذخیره - جریان برای ساختار علت و معلولی شکل ۱ در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲ می‌توان رابطه دیفرانسیلی را برای ساختار نشان داده شده که یک متغیر حالت دارد، نوشت

$$\frac{d(\text{storage})}{dt} = \text{Inflow} + \text{Precipitation} - \text{loss} - \text{regulated Outflow} - \text{spill} \quad (13)$$

در مرحله آخر، روابط ریاضی برای همه متغیرهای تعریف شده در ساختار سیستم ارائه می‌شود.

**۳- معرفی زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس**  
حوضه آبریز رودخانه ارس در منتهی الیه شمال غرب کشور واقع شده به‌طوری که از شمال به رودخانه مرزی ارس و کشورهای آذربایجان و ارمنستان، از غرب به کشور ترکیه، از جنوب و جنوب شرق به حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه و سفیدرود و از شرق به حوضه آبریز تالش و مرداب انزلی محدود است و از نظر اقلیمی تحت تأثیر توده‌های هوای سرد قطبی و معتدل مدیترانه‌ای قرار می‌گیرد. این حوضه آبریز با وسعتی حدود ۳۹۵۳۴ کیلومتر مربع بین مختصات جغرافیایی ۰۲-۴۴ تا ۴۱-۴۸ درجه طول شرقی و ۴۵-۳۷ تا ۴۷-۳۹ درجه عرض شمالی نصف النهار گرینویچ واقع شده است. نزدیک به ۷۱/۵ درصد از پهنه آن را کوهها و ارتفاعات و ۲۸/۵ درصد آن را نواحی دشتی تشکیل داده است. منطقه مورد مطالعه، زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس است که در قسمت شرقی این حوضه و در محدوده استان اردبیل و جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی واقع شده است (شکل ۳).

در این منطقه، سدهای ستارخان، یامچی (اردبیل) و قوری چای در دست بهره‌برداری هستند و دو سد سبلان و عمارت در مراحل اولیه ساخت می‌باشند (جدول ۱). اگرچه سد سبلان در سال ۱۳۸۵ به بهره‌برداری رسیده است اما چون سری زمانی آبدهی‌ها برای کالیبراسیون و اعتبار سنجی مدل تا سال ۱۳۸۵ در دست بود، این سد نیز جزء سدهای در دست ساخت در نظر گرفته شده است.

<sup>3</sup> Storage

<sup>4</sup> Precipitation

<sup>5</sup> Inflow

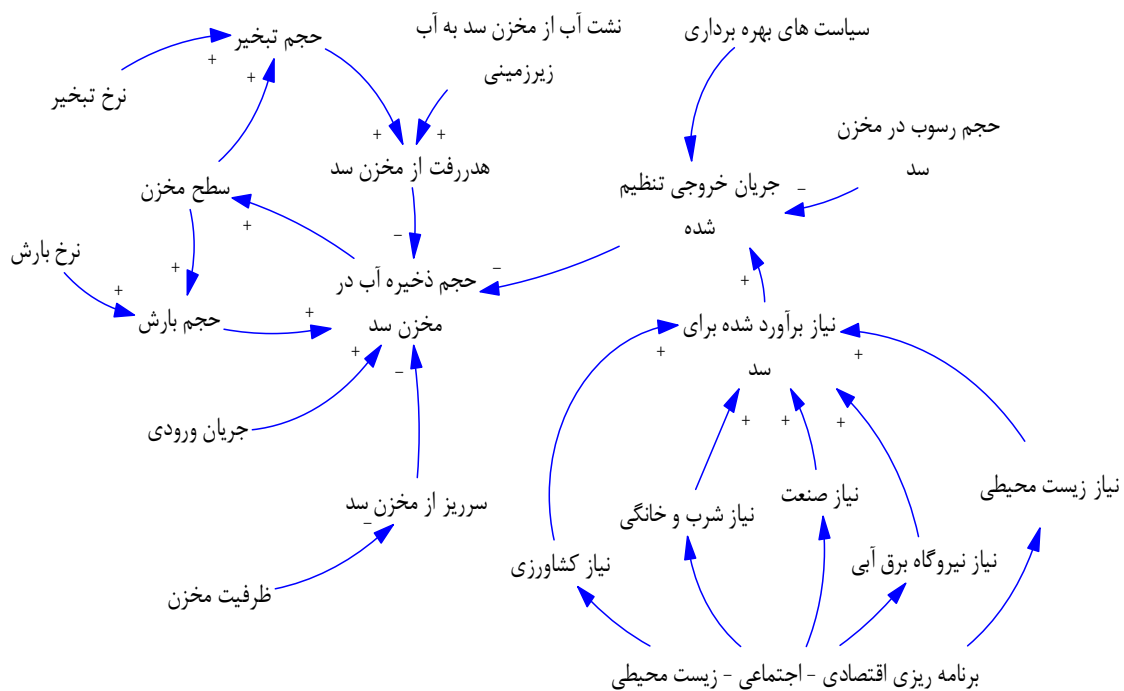
<sup>6</sup> Loss

<sup>7</sup> Spill

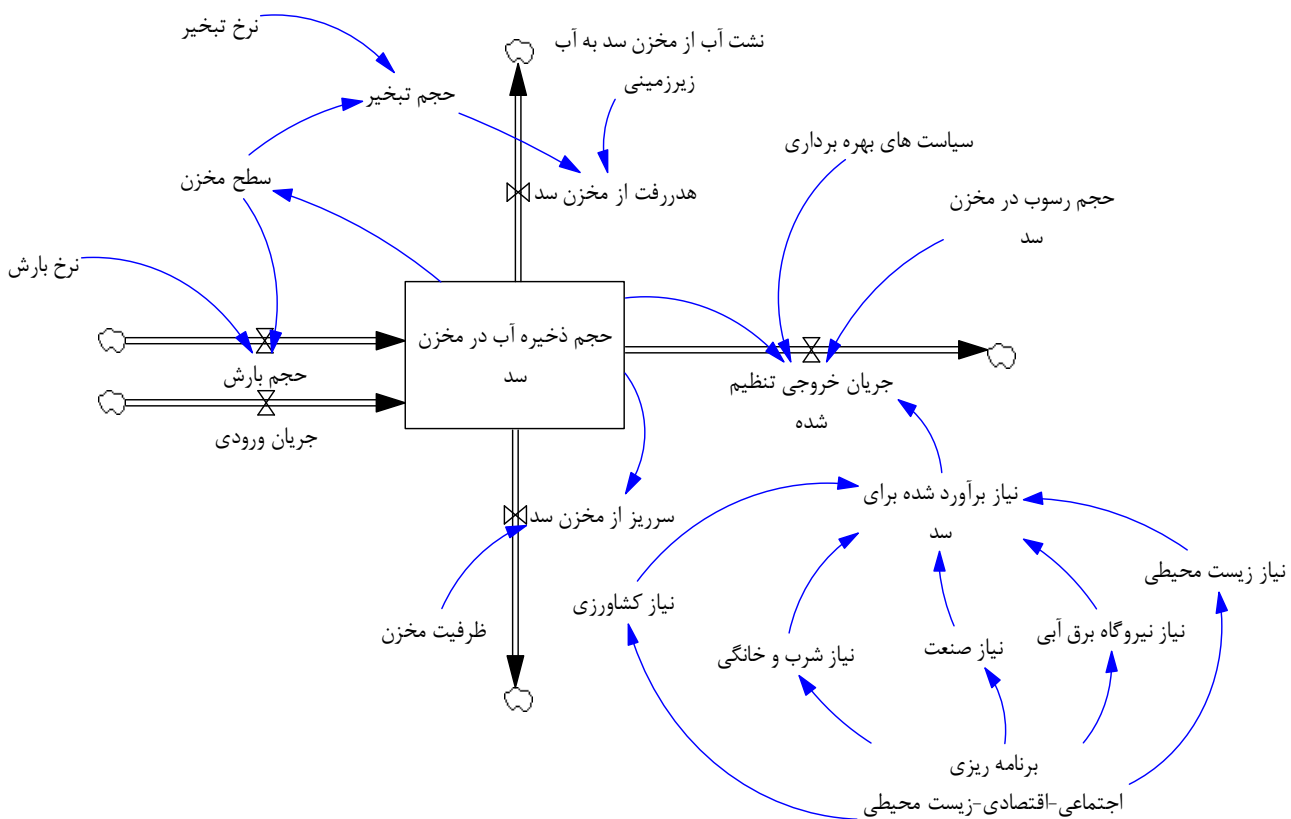
<sup>8</sup> Regulated Outflow

<sup>1</sup> Causal Loop Diagram

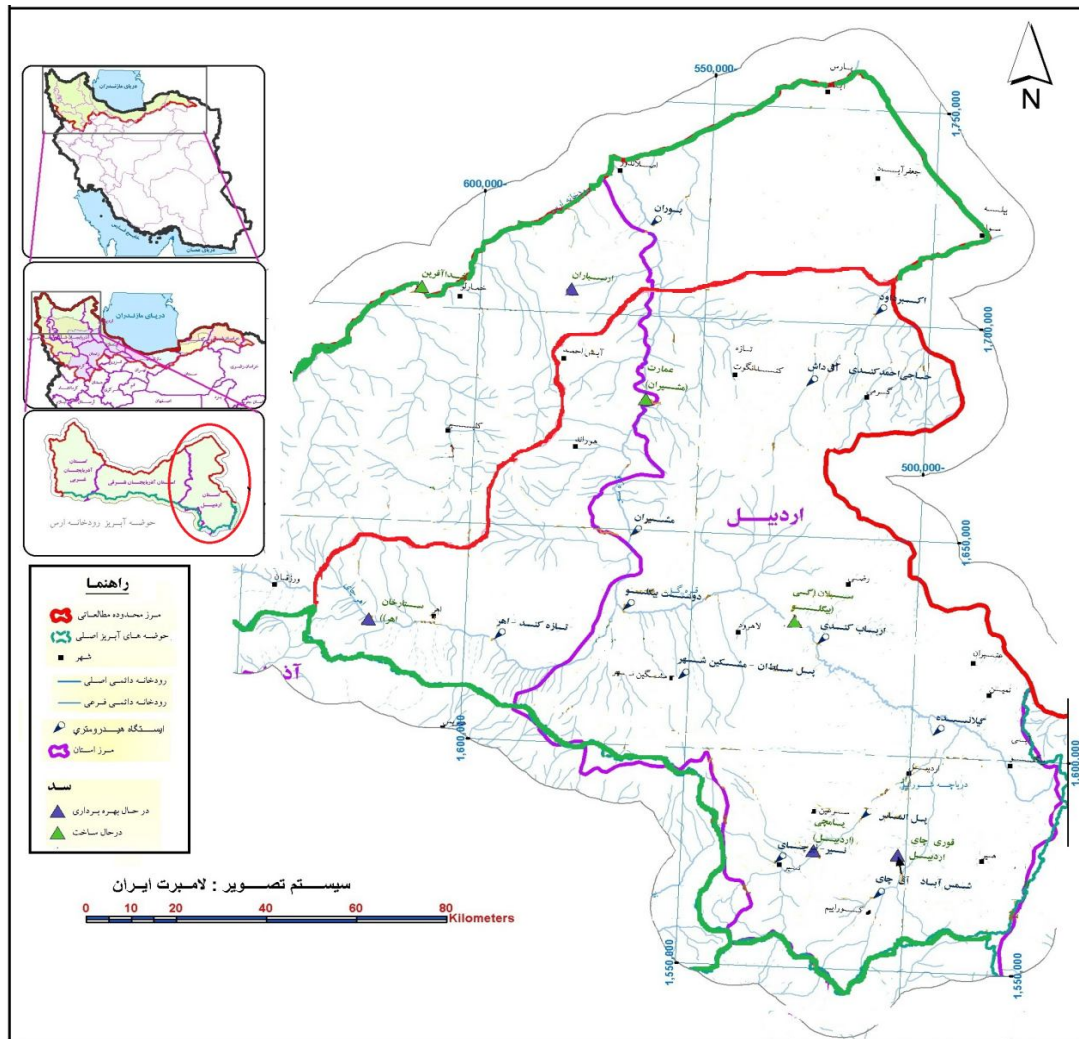
<sup>2</sup> Stock-Flow Diagram



شکل ۱- ساختار علت-معلولی در یک سیستم منابع آب



شکل ۲- نمودار ذخیره - جریان برای ساختار علی - معلولی نشان داده شده در شکل ۱



شکل ۳- زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس

جدول ۱- مشخصات سد ها در زیرحوضه دره رود

نام سد	استان	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	سال بهره‌برداری	حجم کل (م.م.م)	حجم مرده (م.م.م)
سبلان (گی بیگلر)	اردبیل	۵۳۲۶	۱۳۸۵	۱۰۵	۱۱
ستارخان (اهر)	آذربایجان شرقی	۹۱۳	۱۳۷۷	۱۳۱	۱۱
عمارت (مشیران)	آذربایجان شرقی	۱۲۱۸۱	۱۳۹۲	۲۹۴	۶۴
قوری چای اردبیل	اردبیل	۴۰۰	۱۳۷۵	۱۸/۰۷	۰/۳۶
یامچی (اردبیل)	اردبیل	۷۳۰	۱۳۸۲	۸۲	۲

#### ۴- طرح مسئله

نمی‌شود. در شرایط توسعه با توجه به افزایش جمعیت و مسائل اجتماعی - اقتصادی مجموع نیازها به ۶۷۴ (م.م.م. در سال) رسیده و علاوه بر این، نیاز زیست محیطی رودخانه‌ها نیز در اولویت اول باید تأمین شود (جدول ۲). از این رو چند سد برای مطالعه در ناحیه پیشنهاد شده که از میان آنها سدهای سبلان در پایان سال ۱۳۸۵ بهره‌برداری شده و سد عمارت تا پایان سال ۱۳۹۲ بهره‌برداری

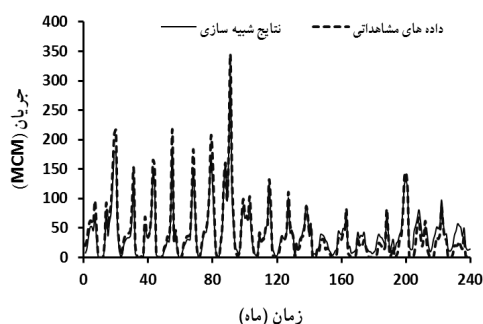
مقدار نیاز تعیین شده در شرایط موجود در این ناحیه در مجموع ۲۶۲ (م.م.م. در سال) است. در این شرایط سه سد در دست بهره‌برداری وجود دارند و نیاز زیست محیطی نیز در نظر گرفته

<sup>۱</sup> میلیون مترمکعب در سال

سناریوهای مطرح شده در شرایط توسعه قرار نمی‌گیرند، اما نتایج شبیه‌سازی در این زیرسیستم‌ها نیز آورده شده است.

### ۲-۵- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل، از داده‌های شرایط موجود و سری زمانی ۲۰ ساله (۱۳۸۵-۱۳۶۵) ایستگاه مشاهده‌ی بوران، در محل تلاقی دره رود و رودخانه ارس استفاده شد. مقدار میانگین درازمدت سالانه در ایستگاه مشاهده‌ی ۴۸۸ (م.م.م. در سال) در مقابل ۴۹۸ (م.م.م. در سال) خروجی مدل است. تغییرات ماهانه جریان مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه بوران نیز در شکل ۴ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر اختلاف ناچیزی که بین مقادیر میانگین درازمدت وجود دارد، روند تغییرات نیز مشابه است.



شکل ۴- مقایسه تغییرات ماهانه جریان در ایستگاه مشاهده‌ی بوران برای سری زمانی مشاهده شده و خروجی مدل

### ۳-۵- نتایج شبیه‌سازی و محاسبه شاخصهای عملکردی

از سری زمانی نیازها، تأمین‌ها و کمبودها در دو زیرسیستم مشیران و قره‌سو برای ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب استفاده شد. برای تعیین وضعیت سیستم در هر گام زمانی با توجه به وزن خاصی که به هر زیرسیستم داده می‌شود، ابتدا از رابطه ۴،  $\varepsilon_{t, total}$  محاسبه شده و سپس با مقدار آستانه  $\varepsilon_m$  مقایسه می‌شود [۱۰]. در این مطالعه با توجه به دو زیرسیستم اصلی، وزن دهی بر اساس نیاز تعیین شده برای هر زیرسیستم صورت گرفته و بر اساس میانگین گیری وزنی و استفاده از مقدار آستانه  $\varepsilon_m = 0.15$ ، وضعیت شکست یا مطلوب در هر گام زمانی تعیین می‌شود. سپس شاخص اعتمادپذیری برای کل سیستم با استفاده از رابطه ۳ و دو شاخص دیگر از هر دو روش هاشیموتو و همکاران در سال ۱۹۸۲ (روابط ۷ و ۱۱) و موی و همکاران در سال ۱۹۸۶ (روابط ۸ و ۱۲) با اندیس‌های ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم منابع آب مورد نظر در زیرحوضه دره رود از حوضه آبریز رودخانه ارس و اعمال

می‌شود. هدف از این مطالعه، ارزیابی عملکرد سیستم منابع آب توصیف شده در صورت افزودن هر یک از این سدها به سیستم است. مدل‌سازی سیستم مورد نظر با روش پویایی سیستم با توجه به چهار سناریوی زیر انجام شده و در نهایت نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از شاخص‌های عملکردی و صرف نظر از مسائل اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی با هم مقایسه شدند: سناریو ۱- استفاده از سازه‌های منابع آب موجود به همراه افزایش نیازها در شرایط توسعه؛

سناریو ۲- افزودن سد سبلان به سیستم شبیه‌سازی شده در سناریو ۱؛

سناریو ۳- افزودن سد عمارت به سیستم شبیه‌سازی شده در سناریو ۱؛

سناریو ۴- افزودن سدهای سبلان و عمارت به سیستم شبیه‌سازی شده در سناریو ۱

جدول ۲- توزیع نیازها به تفکیک زیرسیستم در زیرحوضه دره رود (بر حسب م.م.م. در سال)

نوع نیاز	قره سو	مشیران	اهرچای	قوری چای
نیاز کشاورزی و حقه	۶۶	۶۰	۹۳	۰
نیاز شرب و صنعت	۱۷	۱۱	۱۵	۰
نیاز کشاورزی و حقه	۲۴۵	۱۹۰	۱۲۹	۲۸
نیاز شرب و صنعت	۱۷	۵۰	۱۵	۰
نیاز زیست محیطی	۵۷	۱۱۳	۲۲	۱۰

### ۵- نتایج و بحث

#### ۵-۱- مدل‌سازی

در این مطالعه، برای شبیه‌سازی سیستم منابع آب زیرحوضه دره رود، مدل شبیه‌ساز بر پایه SD در نرم افزار Vensim توسعه داده شد. داده‌های ورودی به مدل شامل مشخصات سدها، نیازها و مصارف در شرایط موجود و توسعه بر اساس گزارش طرح جامع آب حوضه آبریز رودخانه ارس، شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس تهیه شد [۲۲]. مدل‌سازی با سری زمانی جریان بین سالهای ۱۳۶۵-۱۳۸۵ و به صورت ماهانه انجام شد و تنها منبع تأمین آب، آب سطحی بود. به منظور استفاده از شاخصهای عملکردی در ارزیابی سناریوها، سیستم منابع آب مورد نظر به چهار زیرسیستم تقسیم شد: ۱- زیرسیستم مشیران شامل سد عمارت، ۲- زیرسیستم قره سو شامل سدهای یامچی و سبلان، ۳- زیرسیستم اهرچای شامل سد ستارخان و ۴- زیرسیستم قوری چای شامل سد قوری چای. اگرچه دو زیرسیستم اهرچای و قوری چای تحت تأثیر



سناریوهای مختلف در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می شود در شرایط موجود به جز زیرسیستم اهرچای، در دو زیرسیستم دیگر کمبود قابل توجهی مشاهده نمی شود به عبارتی در شرایط موجود برای زیرسیستم قوری چای نیازی تعریف نشده است. در زیرسیستم اهرچای، جریان طبیعی سالانه رودخانه اهرچای در پشت سد ستارخان به طور میانگین ۷۳ (م.م.م) است، این در حالی است که نیاز تعریف شده ۱۰۸ (م.م.م) در سال است. در شرایط توسعه افزایش قابل توجهی در نیازها در هر زیرسیستم مشاهده می شود به گونه ای که این افزایش در دو زیرسیستم مشیران و قره سو به ترتیب ۱۶۶ و ۱۸۰ (م.م.م) در سال معادل ۲۴۰ و ۲۲۰ درصد است. از این رو همانطور که در نتایج سناریو اول مشاهده می شود کمبود زیادی در دو زیرسیستم مدنظر به چشم می خورد. این مسئله در جدول ۴ و از روی شاخصهای عملکردی نیز مشخص است. اعتمادپذیری سیستم از ۹۶ به ۵۶ درصد کاهش پیدا کرده و علاوه بر آن دوره های شکست بیشتر و آسیب پذیری بالاتری است. در شرایطی که هر کدام از سدهای عمارت یا سلان به سیستم افزوده شوند (سناریوهای ۲ و ۳)، اعتمادپذیری و برگشت پذیری (۱) افزایش و هر دو شاخص آسیب پذیری (۲ و ۱) کاهش می یابند. اما همانطور که در جدول ۴ مشخص است شاخص برگشت پذیری (۲) برای همه سناریوها بدون تغییر باقی می ماند. همانطور که در شکل

۵ نشان داده شده است برای سیستم زیرحوضه دره رود بین سالهای ۱۲ و ۱۶ دوره خشکسالی اتفاق افتاده است که سبب افزایش مدت زمان حضور سیستم در وضعیت شکست شده است و از آنجا که این دوره خشکسالی در همه سناریوها وجود دارد شاخص برگشت پذیری (۲) برای همه سناریوها مقدار ثابت ۰/۱۷ است. مسئله نشان می دهد اگرچه در برخی مطالعات استفاده از برآوردهای بیشینه مقدار به دلیل رفتار یکنوای آنها توصیه شده است، اما این نوع برآورد تحت تاثیر شرایط حدی قرار داشته و بر خلاف شاخص برگشت پذیری (۱) نمی تواند اطلاعات مناسبی در این شرایط فراهم کند [۱۳ و ۱۴].

در سناریو ۳ که تنها سد عمارت به سیستم افزوده می شود، اگرچه زیرسیستم قره سو با حجم کمبود سناریو ۱ مواجه می شود، اما در زیرسیستم مشیران همه نیازها تأمین می شود. همچنین کاهش مشاهده شده در اعتمادپذیری در این سناریو به سبب عدم تأمین نیازها در زیرسیستم قره سو است. در هر صورت شاخصهای آسیب پذیری و برگشت پذیری (۱) در جدول ۴ و همچنین کاهش حجم کمبود در جدول ۳، حاکی از این مطلب است که در صورتی که تنها شاخصهای عملکردی به عنوان معیار مقایسه باشد، اعمال سناریو ۳ سبب بهبود بیشتر وضعیت سیستم نسبت به اعمال سناریو ۲ می شود.

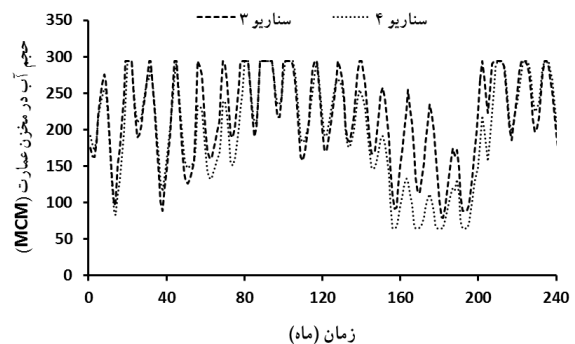
جدول ۳- نتایج شبیه سازی سیستم منابع مورد نظر برای هر چهار زیرسیستم (میانگین درازمدت سالانه بر حسب م.م.م)

شرایط موجود	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴
حجم نیاز	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰
حجم تامین شده	۱۷۱	۱۸۸	۲۴۰	۲۳۴
حجم کمبود	۷۰	۵۲	۰	۷
حجم نیاز	۲۶۲	۲۶۲	۲۶۲	۲۶۲
حجم تامین شده	۱۴۱	۱۸۳	۱۴۱	۱۸۳
حجم کمبود	۱۲۱	۷۹	۱۲۱	۷۹
حجم نیاز	۱۰۸	۱۴۴	۱۴۴	۱۴۴
حجم تامین شده	۷۰	۸۸	۸۸	۸۸
حجم کمبود	۳۸	۵۶	۵۶	۵۶
حجم نیاز	۰	۲۸	۲۸	۲۸
حجم تامین شده	۰	۱۵	۱۵	۱۵
حجم کمبود	۰	۱۳	۱۳	۱۳

جدول ۴- شاخصهای عملکردی برای سیستم شبیه سازی شده (شاخص آسیب پذیری بر حسب م.م.م است)

سناریو	اعتمادپذیری	برگشت پذیری (۱)	برگشت پذیری (۲)	آسیب پذیری (۱)	آسیب پذیری (۲)
شرایط موجود	۰/۹۶	۰/۵۶	۰/۳۳	۱۱	۲۴
سناریو ۱	۰/۵۶	۰/۲	۰/۱۷	۱۶۸	۲۸۷
سناریو ۲	۰/۶۷	۰/۲۷	۰/۱۷	۱۱۹	۲۵۱
سناریو ۳	۰/۵۹	۰/۲۹	۰/۱۷	۸۲	۱۵۴
سناریو ۴	۰/۷۵	۰/۳۳	۰/۱۷	۷۶	۱۷۱

نکته دیگری که از شکل ۵ بر می آید این است که با وجود اینکه هر دو سد عمارت و سبلان در سناریو ۴ در سیستم هستند، حجم آب مخزن عمارت کمتر از سناریو ۳ است. این مسئله نشان می دهد با وجود اینکه سد سبلان در بالادست سد عمارت قرار دارد اما چون مقدار نیازها در زیرسیستم قره سو زیاد است، سد سبلان نه تنها نمی تواند وضعیت سیستم در پایین دست را ارتقا دهد بلکه در دوره خشکسالی نتیجه منفی بر روی آن خواهد گذاشت. همین مسئله سبب شده است که استفاده از برآورد مقدار بیشینه در محاسبه شاخص آسیب پذیری نیز در سناریو ۴ مقدار بیشتری نسبت به سناریو ۳ داشته باشد. اما در هر حال در این سناریو، شاخصهای اعتمادپذیری، برگشت پذیری و همچنین تأمین نیاز افزایش یافته و کاهش آسیب پذیری (۱) نیز نمایانگر کاهش آسیب احتمالی به سیستم در صورت حادث شدن وضعیت شکست در سیستم است.



شکل ۵- تغییرات حجم آب در مخزن عمارت در سناریوهای ۳ و ۴

## ۶- نتیجه گیری

توسعه مدل شبیه ساز در محیط نرم افزار Vensim که مبتنی بر روش پویایی سیستم است به این دلیل که امکان اعمال سیاستهای مختلف را در یک مدل واحد و به صورت سریع فراهم می کند، روش مناسبی برای شبیه سازی سیستمهای منابع آب و بررسی نتایج احتمالی ناشی از اعمال سیاستهای گوناگون در شرایط

## ۷- مراجع

- 1- Simonovic, S. P. (2000). "Tools for water management, one view of the future." *International Water Resources Association*, 25, 76-88.
- 2- Hosseinpour Tehrani, M., Davari, R., and Ghahreman, B. (2008). "Operation of reservoir systems using fuzzy logic." *4<sup>th</sup> National Congress of Civil Eng.*, Tehran University, Tehran (In Persian)
- 3- Khodabakhshi, F., and Borhani Darian, A. (2008). "Operation of multi-reservoir systems using simulated annealing approach." *4<sup>th</sup> National Congress of Civil Eng.*, Tehran University, Tehran (In Persian)
- 4- kaharkaboudi, R., Khayyat Kholghi, M., Jahromi, M., and Arab, D. (2008). "Operation of multi-reservoir system using fuzzy approach." *4<sup>th</sup> National Congress of Civil Eng.*, Tehran University, Tehran. (In Persian)

توسعه است. برای ارزیابی عملکرد سیستم از سه شاخص عملکردی اعتمادپذیری، برگشت پذیری و آسیب پذیری استفاده شد. همچنین دو تعریف برآورد مبتنی بر میانگین و برآورد مبتنی بر مقدار بیشینه برای شاخصهای برگشت پذیری و آسیب پذیری مورد استفاده قرار گرفت. علیرغم اینکه نتایج برخی مطالعات گذشته حاکی از برتری برآوردهای مبتنی بر مقدار بیشینه در قیاس با برآوردهای مبتنی بر میانگین بود، نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مقدار بیشینه، ارزیابی درستی از سیستم مورد نظر ارائه نمی دهد. زیرا این برآوردها، بین سیستمی که تنها یک بار در وضعیت شکست با مدت  $t_d$  باشد و سیستمی که چند بار در این وضعیت باشد، تفاوتی قائل نیستند. همچنین این برآوردها تحت تاثیر شرایط حدی مانند خشکسالی قرار می گیرند. از این رو استفاده از برآوردهای مبتنی بر میانگین می تواند دید جامع تری نسبت به سیستم ارائه دهد. نتایج شبیه سازی در کنار استفاده از شاخصهای عملکردی، حاکی از عدم اعتمادپذیری و حجم کمبودها در زیرسیستم ها ناشی از افزایش نیازها در شرایط توسعه است. افزودن هر یک از سدهای سبلان و عمارت به سیستم، سبب بهبود وضعیت سیستم می شود اما در شرایطی که تنها یک سد قرار باشد به سیستم افزوده شود، شاخصهای عملکردی نشان دهنده عملکرد مناسب تر سیستم در صورت افزودن سد عمارت نسبت به سد سبلان به سیستم هستند. استفاده از این شاخصها در کنار جنبه های دیگر مانند جنبه های اقتصادی و اجتماعی می تواند کمک قابل توجهی در ارزیابی سیاست های مورد نظر در سیستم های منابع آب داشته باشد. در این مطالعه برای تعیین شرایط مطلوب و شکست، هر زیرسیستم با توجه به مقدار نیاز مشخص شده وزن دهی شد این در حالی است که در تعیین وزن ها می توان اثر عوامل اجتماعی و اقتصادی را اعمال نمود. علاوه بر ارزیابی سیاست ها، آگاهی از آسیب پذیری و دوره شکست احتمالی در شرایط حادث شدن وضعیت شکست، می تواند اطلاعات مفیدی برای تصمیم گیران به همراه داشته باشد.

- 5- Salavitabar, A., Zarghami, M., and Abrishamchi, A. (2006). System dynamic model in Tehran urban water management." *J. of Water and Wastewater*, 59, 12-28. (In Persian)
- 6- Momeni, A., Tajrishy, M., and Abrishamchi, A. "Modeling of multi-purpose reservoir using system dynamics." *J. of Water and Wastewater*, 57, 47-58. (In Persian)
- 7- Golian, S., Abrishamchi, A., Tajrishy, M. (2007). "Analysis of scenarios of water resources operation in watershed using system dynamic." *J. of Water and Wastewater*, 63, 70-80. (In Persian)
- 8- Ahmad S., and Simonovic, S. P. (2000). "System dynamics modeling of reservoir operations for flood management." *J. Computing in Civil Engineering*, 14(3), 190-198.
- 9- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation." *J. Water Resources Research*, 18(1), 14-20.
- 10- Srdjevic, B., and Obradovic, D. (1995). "Reliability-risk concept in evaluating control strategies for multireservoir water resources system." Roberts, P.D., and Ellis, J. E. (Eds.) *Large scale systems: Theory and applications*, Pergamon.
- 11- Simonovic, S. P., and Li, L. H. (2003). "Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system." *J. Water Resources Planning and Management*, 129(5), 361-372.
- 12- Moy, W. S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir." *J. Water Resources Research*, 22(4), 489-498.
- 13- Kundzewicz, Z. W., and Kindler, J. (1995). "Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resources systems." Simonovic, S. P., Kundzewicz, Z., Rosbjerg, D., and Takeuchi, K. (Eds.) *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resources Systems*, Proc. Boulder Symp., IAHS Press, Wallingford, UK., 217-224.
- 14- Kjeldsen, T. R., and Rosbjerg, D. (2004). "Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems." *J. Hydrological Sciences*, 49(5), 755-767.
- 15- Srdjevic, B., and Obradovic, D. (1997). "Reliability and risk in agricultural irrigation." *IFAC/ISHS 3<sup>rd</sup> International Workshop on Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, Hannover, Germany. 97-102.
- 16- Forrester, J. W. (1964). *Industrial dynamics*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
- 17- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics, system thinking and modeling for a complex world*, McGraw-Hill, N.Y.
- 18- Lee, J. (1993). "A formal approach to hydrological model conceptualization." *J. Hydrological Sciences*, 38(5), 391-401.
- 19- Jutla, A. S. (2006). "Hydrologic modeling of reconstructed watersheds using a system dynamics approach." PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- 20- Li, L., Xu, H., Chen, X., and Simonovic, S. P. (2010). "Streamflow forecast and reservoir operation performance assessment under climate change." *J. Water Resources Management*, 24, 83-104.
- 21- Stave, K. A. (2003). "A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada." *J. Environmental Management*, 67, 303-313.