



## Evaluating the Water Resource Systems Performance Using Fuzzy Reliability, Resilience and Vulnerability

H. R. Safavi<sup>1\*</sup> and M. H. Golmohammadi<sup>2</sup>

### Abstract

This study highlights the need to improve the estimation of the water resources performance criteria such as reliability, resilience and vulnerability (RRV) regarding common approaches. The study also proposes a new technique to obviate disadvantages of common (classic) approaches. RRV criteria are very useful for evaluating performance of water resources system which are used in many researches in the last three decades. This study explains that common approaches of quantifying these estimators have unreliable performance in thresholds of desired values of parameters under investigation such as water supply. This weak point in previous approaches has been shown by an evident example, demonstrating that this problem could change exact values of reliability, resilience and vulnerability in evaluating the water resource system performance. This would also lead to incredible inaccuracy in evaluating the sustainability index of a water system. This study developed an approach to improve PRV performance criteria for water resource systems performance evaluation. The new relations are based on previous formulas with improvements in their structures using the concept of membership functions in fuzzy theory. The Zayandehrud basin has been used as a case study to compare and assess the new and previous approaches. Comparison of the results of the new proposed approach with those of the common approaches to estimate performance criteria as well as their summaries by sustainability index showed that the new approach is very effective and practical meanwhile eliminating disadvantages of common approach.

**Keywords:** Water Resource System Performance Evaluation, Reliability, Resilience, Vulnerability, Sustainability Index, Fuzzy Technique.

Received: July 11, 2015

Accepted: October 1, 2015

## ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب با استفاده از معیارهای اطمینان پذیری، برگشت پذیری و آسیب پذیری فازی

حمیدرضا صفوی<sup>۱\*</sup> و محمدحسین گل محمدی<sup>۲</sup>

### چکیده

مقاله حاضر ضمن تبیین لزوم بازنگری در روش‌های موجود جهت تخمین معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب شامل اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، روشی جدید جهت مرتفع کردن معایب و اشکالات روش‌های کمی کردن این معیارها در روش‌های کلاسیک ارائه می‌دهد. اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری معیارهای بسیار پرکاربردی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب می‌باشند که در سه دهه اخیر در بسیاری تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که روش‌های متداول جهت کمی کردن این معیارها، در مقادیر حدی (آستانه) از مقادیر مطلوب پارامتر مورد مطالعه مانند تأمین نیاز آبی، دارای عملکرد غیرقابل اعتماد و غیر قابل درکی نسبت به واقعیت موجود هستند. این نقطه ضعف در روش‌های قبلی با استفاده از یک مثال ساده تئوریک نشان داده شده‌است که بیان می‌کند این نقطه ضعف می‌تواند موجب تغییر مقادیر قابل درک از اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب شود؛ همچنین تخمین نادرست این معیارها باعث محاسبه نادرست و غیرقابل قبول شاخص پایداری برای یک سیستم منابع آب می‌شود. مطالعه حاضر روشی را جهت بهبود تخمین سه معیار عملکرد مذکور برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب توسعه می‌دهد. روابط جدید با استفاده از مفهوم توابع عضویت در تئوری فازی و برپایه روابط قبلی جهت بهبود عملکرد معیارها توسعه داده شده‌است. حوضه آبریز زاینده‌رود به عنوان مطالعه موردی این تحقیق جهت مقایسه و بررسی نتایج روش جدید نسبت به روش‌های قبلی مورد استفاده قرار گرفته‌است. مقایسه نتایج روش فازی و روش‌های کلاسیک و جمع‌بندی آن‌ها به وسیله شاخص پایداری نشان می‌دهد که روش ارائه شده در تحقیق حاضر ضمن رفع اشکال روش‌های قبلی، در ارزیابی عملکرد بسیار مؤثر و کارآمد می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب، اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، شاخص پایداری، تکنیک فازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۴/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۷/۹

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan. Email: hasafavi@cc.iut.ac.ir

2- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan. Email: m.golmohammadi@cv.iut.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

\*- نویسنده مسئول

(Sarang et al., 2008). (Sandoval-Solis (2011) در رساله دکترای خود ضمن تبیین برخی اشکالات شاخص توسعه داده شده، با استفاده از میانگین هندسی معیارهای عملکرد<sup>۱۴</sup> به جای ضرب آن‌ها به اصلاح این شاخص پرداخت و با تفکیک و افزودن دو معیار اطمینان‌پذیری برپایه زمان و حجم<sup>۱۵</sup> که به ترتیب توسط Hashimoto et al. (1982) و McMahon et al. (2006) و همچنین معیار حداکثر کمبود که توسط Moy et al. (1986) ارائه شده بود، روابطی وزنی برای به دست آوردن شاخص پایداری حوضه‌های آبریز بزرگ با استفاده از مقدار پایداری به دست آمده در زیرحوضه‌ها و بخش‌های مختلف ارائه نمود.

با توجه به مطالب فوق این مهم آشکار می‌شود که معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب، از مهم‌ترین اجزاء تخمین پایداری منابع آب براساس شاخص پایداری ارائه شده هستند. این معیارها برای ارزیابی سیاست‌های مدیریت منابع آب به کار گرفته می‌شوند و به کاربر توانایی مقایسه گزینه‌های مختلف مدیریتی در سیستم را ارائه می‌دهند. این معیارها می‌توانند پارامترهای ساده‌ای چون میانگین پارامترهای مختلف از قبیل ظرفیت ذخیره مخزن، تأمین نیاز، تبخیر، کمبود آب شهری (میانگین کمبودها) و خروجی از سیستم باشند (Vigerstøl, 2003). معیارهای احتمالاتی عملکرد<sup>۱۶</sup> معیارهای اطمینان‌پذیری از نظر زمان و حجم (TCEQ, 2007) و برگشت‌پذیری سیستم می‌باشند.

معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب بر اساس پارامترهای آب مورد نیاز ( $Demand_t^j$ ) و مقدار آب تأمین‌شده ( $Supply_t^j$ ) برای زمین مصرف‌کننده یا کاربر آب و یا یک منبع آب که می‌تواند مصارف کشاورزی، صنعت، شرب و شهری و محیط زیست ویا سدها و مخازن آب زیرزمینی باشند در گام  $t$  تعریف می‌شوند. لازم به ذکر است که برای به کارگرفتن این روابط در منابع آب باید حد مطلوب وضعیت منبع به جای  $Demand_t^j$  و وضعیت مورد بررسی منبع به جای  $Supply_t^j$  در روابط جایگزین شوند. کمبود آب ( $D_t^j$ ) در هر گام زمانی  $t$  بر اساس اختلاف بین  $Demand_t^j$  و  $Supply_t^j$  محاسبه خواهد شد (Loucks, 1997):

$$D_t^j = \begin{cases} Demand_t^j - Supply_t^j & \text{if } Demand_t^j > Supply_t^j \\ 0 & \text{if } Demand_t^j \leq Supply_t^j \end{cases} \quad (1)$$

بدیهی است اگر محاسبات برای تعیین معیارهای عملکرد در منابع آب به کار گرفته شوند، چنانچه حجم مخزن سد یا حجم آبخوان در یک دوره از حد مطلوب بیشتر شود، در آن دوره نسبت به حد مطلوب موفقیت مطلق حاصل شده و خروجی رابطه (۱) برابر صفر خواهد بود.

هدف از اقدامات و سیاست‌گذاری‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب کاهش تأثیر سیاست‌هایی است که اثرات منفی چه در وضعیت کنونی و چه در آینده بر روی سیستم‌های منابع آب می‌گذارند؛ و در مقابل توسعه سیاست‌ها و اقداماتی است که اثرات مثبت از نظر اقتصادی-اجتماعی، زیست‌محیطی، سیاسی و حقوقی بر سیستم دارند. برای این هدف، لازم است پارامترها یا شاخص‌هایی جهت اندازه‌گیری عملکرد سیستم وجود داشته باشند تا شرایط سیستم‌های منابع آب را تحت سیاست‌ها و برنامه‌های مدیریتی مختلف (سناریوها) مورد ارزیابی و مقایسه قرار دهند (Sandoval-Solis, 2011).

نحوه پایش و ارزیابی سیستم‌های منابع آب و معیارهای مربوط به آن از دغدغه‌های محققان و تصمیم‌گیرندگان در سه دهه اخیر بوده است. شاخص‌ها نماینده ترکیبی از معیارهای عملکرد سیستم یا به عبارت دیگر چکیده‌ای از فاکتورهای مختلف ارزیابی سیستم می‌باشند (Boysen, 2002). تاکنون شاخص‌های متعددی برای فرآیندهای زیست‌محیطی از جمله شاخص زیست‌محیطی<sup>۱</sup> (Howmiller et al., 1977; Milbrink, 1983)، شاخص تنش زیست‌محیطی<sup>۲</sup> (Reiquam, 1972)، شاخص زیست‌محیطی<sup>۳</sup> (Esty et al., 2005)، شاخص زیست‌محیطی چندمعیاره<sup>۴</sup> (Hajkowicz, 2006)، و همچنین برخی شاخص‌ها که به‌طور خاص برای منابع آب به کار گرفته می‌شوند از قبیل شاخص ریسک خشکسالی<sup>۵</sup> (Zongxue, 1998)، شاخص شدت خشکسالی پالمر<sup>۶</sup> (Palmer, 1965)، شاخص جامع خشکسالی (Safavi et al., 2014)، شاخص کیفیت آب (Brown et al., 1972)، شاخص عدالت<sup>۷</sup> (Lence et al., 1997)، شاخص برگشت<sup>۸</sup> (Fanai, 1997) و شاخص توافق عام یا رضایت عمومی<sup>۹</sup> (Takeuchi, 1998) توسعه داده شده‌اند.

Loucks (1997) برای اولین بار شاخصی را برای کمی کردن پایداری سیستم‌های منابع آب با استفاده از سه معیار برگشت‌پذیری<sup>۱۰</sup>، اطمینان‌پذیری<sup>۱۱</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۱۲</sup> سیستم توسعه داد. وی شاخص پایداری (SI)<sup>۱۳</sup> را برای ارزیابی کارایی گزینه‌های مختلف مدیریتی از دیدگاه کاربران آب و محیط‌زیست تعریف نمود. این شاخص، تخمینی بر ظرفیت سیستم در کاهش آسیب‌پذیری آن می‌باشد. اگر یک سیاست پیشنهادی باعث شود که یک سیستم پایدارتر گردد، این شاخص نشان می‌دهد که سیستم ظرفیت بالایی در کاهش آسیب‌پذیری در آینده دارد. پس از آن شاخص پیشنهادی در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفت (Safavi et al., 2013; )

که در آن  $N^T()$  تعداد گام‌های زمانی در طول دوره مطالعاتی است که شرط درون پراکنش در آن‌ها اتفاق افتاده‌است.

**آسیب‌پذیری:** آسیب‌پذیری پارامتری شبیه کمبودها در سیستم است اگر اتفاق بیافتد (McMahon, 2006). اساساً، آسیب‌پذیری شدت شکست‌های سیستم را بیان می‌کند و می‌تواند به عنوان (۱) میانگین شکست‌ها (Loucks et al., 2005)، (۲) میانگین ماکزیمم کمبودها در طول یک دوره متوالی شکست در سیستم (Hashimoto et al., 1982) و (۳) احتمال بیشتر شدن کمبود در یک یا چند دوره از یک حد معین (Menzoda et al., 1997) تعریف شود. براساس آخرین روابط ارائه‌شده، معیار آسیب‌پذیری به عنوان نسبت مجموع کل کمبودها به تعداد گام‌هایی که در آن‌ها کمبود اتفاق افتاده تقسیم بر کل نیاز کاربر زام که می‌تواند سالانه و یا براساس طول دوره‌ای که نیاز براساس آن سنجیده می‌شود تعریف گردد:

$$Vul^j = \frac{\sum_{t=1}^T (D_t^j / D_t^j > 0)}{\left[ \frac{T}{N} (D_t^j > 0) \right] \sum_{t=1}^T Demand} \quad (4)$$

$$100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T;$$

$$0 \leq Vul^j \leq 100\%$$

براساس تعریف سوم، آسیب‌پذیری را می‌توان به عنوان حداکثر کمبود در طول دوره‌های مورد مطالعه که در آن‌ها عدم مطلوبیت رخ داده‌است تعریف نمود:

$$Vul^j = \max \left\{ \sum_{i \in J_t} C^i - Suppl^j, i = 1, \dots, T \right\} \quad (5)$$

که در آن  $J_1, \dots, J_T$  دوره‌هایی هستند که در آن‌ها عدم مطلوبیت یا عدم تأمین نیاز به طور کامل رخ داده‌است؛ و  $C^i$  معیار یا حدی است (حد مطلوب) که مقادیر تأمین شده یا شرایط منابع با آن در دوره زام مقایسه می‌گردد. دوره‌ها می‌توانند سالانه و یا براساس طول دوره‌ای که نیاز براساس آن سنجیده می‌شود در نظر گرفته شوند.

**شاخص پایداری:** شاخص پایداری جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در مقایسه و تصمیم‌گیری بین گزینه‌های مختلف مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد (Lane et al., 2014). این شاخص براساس معیارهای عملکرد به صورت زیر تعریف می‌شود (Sandoval-Solis et al., 2011):

$$SI^j = \{ Re l^j \times Re s^j \times (1 - Vul^j) \}^{1/3} \quad (6)$$

همان‌طور که در رابطه (۶) مشاهده می‌شود اجزاء اصلی تخمین شاخص پایداری همان معیارهای عملکرد سیستم هستند و علاوه بر

**اطمینان‌پذیری:** اطمینان‌پذیری یا قابلیت اطمینان با این مفهوم تعریف می‌شود که با چه احتمالی آب اختصاص یافته به مصرف‌کننده نیاز آن را تأمین خواهد نمود (Hashimoto, 1982; Klemeš et al., 1981) یا سیستم تا چه حد در حالت مطمئن و عدم شکست کار خواهد کرد. روابط ارائه‌شده نسبت تعداد گام‌های زمانی را که نیاز مصرف‌کننده در طول دوره شبیه‌سازی به طور کامل تأمین شده‌است ( $D_t^j=0$ ) را به کل دوره شبیه‌سازی به عنوان اطمینان‌پذیری تعریف نموده‌اند:

$$Re l^j = \frac{N_s}{T} \times 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T; \quad 0 \leq Re l^j \leq 100\% \quad (2)$$

که در آن  $N_s$  نشان‌دهنده تعداد گام‌های زمانی است که نیاز مصرف‌کننده زام به طور کامل تأمین شده و یا کمبود آب برابر صفر بوده‌است ( $D_t^j=0$ )؛ و  $T$  تعداد کل گام‌های زمانی در طول دوره شبیه‌سازی یا دوره مورد بررسی می‌باشد (McMahon et al., 2006).

**برگشت‌پذیری یا انعطاف‌پذیری:** برگشت‌پذیری توانایی

سیستم در تغییر شرایط آن سیستم می‌باشد. در واقع این پارامتر برای سیستم‌های منابع آب به این صورت تعریف می‌شود که احتمال اینکه سیستم پس از شکست به حالت مطلوب بازگردد چقدر است. به علت اینکه شرایط آب و هوایی و شرایط سیستم‌های منابع آب در بسیاری مواقع یکنواخت و ثابت نیستند، برگشت‌پذیری به عنوان یک پارامتر آماری برای بررسی انعطاف‌پذیری سیستم نسبت به تغییر شرایط و سیاست‌های مختلف مدیریتی نیز در نظر گرفته می‌شود (WHO, 2009; IPCC, 2007). براساس مطالعات Hashimoto et al. (1982) احتمال اینکه یک سیستم پس از شکست به حالت مطلوب برگردد را برگشت‌پذیری گویند. Moy et al. (1986) ماکزیمم دوره‌های متوالی که یک سیستم قبل از بازگشت به حالت مطلوب، دارای کمبود بوده را به عنوان تعریف برگشت‌پذیری یا انعطاف‌پذیری سیستم‌های منابع آب تعریف کردند. امروزه پرکاربردترین تعریف از برگشت‌پذیری همان تعریف احتمالاتی آن است که نسبت تعداد گام‌های زمانی که در طول دوره شبیه‌سازی، سیستم از حالت شکست به حالت مطلوب تغییر کرده به تعداد کل گام‌های زمانی که در آن‌ها سیستم با کمبود مواجه بوده‌است را برگشت‌پذیری سیستم گویند (Ashofteh et al., 2015):

$$Re s^j = \frac{\sum_{t=1}^T (D_{t+1}^j = 0 | D_t^j > 0)}{\sum_{t=1}^T (D_t^j > 0)} \times 100\% \quad \forall t = 1, 2, \dots, T; \quad (3)$$

$$0 \leq Re s^j \leq 100\%$$

اینکه هر کدام مفهوم خاص خود را در نتیجه سیاست‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ارائه می‌کنند، در تخمین مقدار کمی شاخص پایداری سیستم نیز نقش اساسی دارند. بنابراین عدم محاسبه صحیح این معیارها، منجر به تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌های اشتباه و نادرستی می‌شود که گاه می‌تواند جبران‌ناپذیر باشد.

El\_Baroudy and Simonovic (2004) روابطی را برای معیار اطمینان‌پذیری سیستم با دیدگاه فازی توسعه دادند. آنها معیار جدیدی با عنوان معیار اطمینان‌پذیری-آسیب‌پذیری ترکیبی را نیز با دیدگاه فازی توسعه دادند و با استفاده از تعریف Moy et al. (1986) به توسعه روابطی برای برگشت‌پذیری سیستم پرداختند. از آنجا که ۱- تعاریف ارائه شده در تحقیقات ایشان متفاوت از تعاریف ارائه شده برای معیارهای عملکرد در دیدگاه احتمالاتی است و ۲- تمامی محاسبات در روش ارائه‌شده توسط ایشان محاسبات پیچیده فازی است؛ معیارهای معرفی‌شده توسط ایشان کمتر مورد استفاده محققین قرار گرفت.

در این تحقیق ضمن تبیین اشکالی اساسی در فرمولاسیون معیارهای عملکرد از دیدگاه احتمالاتی، در قالب یک مثال تئوریک و ساده، با استفاده از مفهوم توابع عضویت<sup>۱۷</sup> در سیستم‌های فازی، روابط مربوط به آن‌ها اصلاح شده‌اند تا خروجی این روابط با واقعیت محسوس عملکرد سیستم‌های منابع آب انطباق بیشتری داشته باشند. بنابراین هدف از این تحقیق بهبود کارایی معیارهای پرکاربرد عملکرد سیستم‌های منابع آب هستند که برپایه دیدگاه احتمالاتی توسعه داده شده‌اند و متفاوت از روابطی هستند که توسط El\_Baroudy and Simonovic (2004) با دیدگاه فازی توسعه داده شده‌اند. عملکرد معیارهای فازی در قالب یک مثال تئوریک و همچنین مطالعه موردی از عملکرد سیستم‌های تأمین آب در حوضه آبریز زاینده‌رود مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته‌اند. در مطالعه موردی، از خروجی سناریوی روند<sup>۱۸</sup> از مدل جامع منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود که با استفاده از نرم‌افزار WEAP<sup>۱۹</sup> و توسط Safavi et al. (2015) توسعه داده شد، استفاده شده است. سناریوی روند در این مطالعات به معنی بررسی وضعیت آینده منابع و مصارف آب در حوضه آبریز زاینده‌رود برای آینده نزدیک (از سال آبی

۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹) و براساس ادامه روند سیاست‌های موجود و حال حاضر در حوضه می‌باشد. در پایان نتایج حاصل از معیارهای عملکرد فازی و کلاسیک و همچنین جمع‌بندی آن‌ها در شاخص پایداری سیستم مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته و نشان داده شده‌است که در مواردی که سیستم در حالت‌های حدی عمل می‌کند، چگونه معیارهای حاصل از روابط کلاسیک می‌توانند موجب خطا در تصمیم‌گیری‌های مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب شوند.

## ۲- روش تحقیق

برای شروع در ارائه روش تحقیق، یک مثال ساده تئوریک ارائه می‌گردد. فرض شود در طول ۱۳ گام زمانی نیاز یک مصرف‌کننده ثابت و به اندازه ۵۰ واحد باشد. همچنین فرض می‌شود تأمین نیاز این مصرف‌کننده در طول دوره زمانی طبق جدول زیر باشد.

طول دوره به صورت فرد در نظر گرفته شده‌است تا عملکرد روابط در تعداد دوره‌های موفقیت بیشتر (دیدگاه کلاسیک) و یا با مطلوبیت بیشتری (دیدگاه فازی) مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین در دوره‌های زوج، فرض شده که سیستم با کمبود شدیدی در برابر نیاز مواجه می‌شود و در دوره بعد این کمبود شدیداً کاهش می‌یابد؛ بنابراین طبق تعریف احتمالاتی معیار برگشت‌پذیری، این سیستم قاعدتاً باید دارای برگشت‌پذیری بسیار بالایی باشد. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که در حالت (۱) در دوره‌های فرد یعنی کمی بیش از نیمی از کل دوره مورد بررسی، سیستم نیاز مصرف‌کننده را با اختلاف ۰/۱ واحد تأمین می‌کند. در اکثر مطالعات منابع آب تأمین این مقدار از نیاز در یک دوره چه از نظر کارشناسان و ذینفعان بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود. اما این مطلب در روابط قطعی (کلاسیک) مربوط به اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری به عنوان یک شکست یا کمبود در نظر گرفته می‌شود. در حالت (۲) مشاهده می‌شود که سیستم تقریباً مانند حالت (۱) عمل می‌کند با این تفاوت که در دوره‌های فرد ۰/۱ واحد بیشتر از حالت (۱)، نیاز را تأمین کرده‌است. حال با توجه به این توضیحات و با استفاده از روابط (۲) تا (۴) معیارهای عملکرد و سپس از رابطه (۶) شاخص پایداری برای این دو مثال به صورت جدول ۲ محاسبه می‌شوند.

جدول ۱- مقادیر نیاز و تأمین آن در دو حالت

دوره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
نیاز (واحد)	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
حالت ۱ مقدار تأمین شده	۴۹/۹	۱	۴۹/۹	۱	۴۹/۹	۱	۴۹/۹	۱	۴۹/۹	۱	۴۹/۹	۱	۴۹/۹
حالت ۲ مقدار تأمین شده	۵۰	۱	۵۰	۱	۵۰	۱	۵۰	۱	۵۰	۱	۵۰	۱	۵۰

## جدول ۲- مقایسه معیارهای عملکرد و شاخص پایداری حاصل

از روابط کلاسیک برای مثال جدول ۱

معیار حالت	ضریب اطمینان (%)	برگشت پذیری (%)	آسیب پذیری (%)	شاخص پایداری (%)
حالت ۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۵/۳۴	۰/۰۰
حالت ۲	۵۳/۸۰	۱۰۰/۰۰	۹۸/۰۰	۲۲/۰۸

مشاهده می شود که با وجود آن که تفاوت بسیار ناچیزی در حالت (۱) و حالت (۲) در تأمین نیاز و یا عملکرد سیستم وجود دارد ولی نتایج مربوط به روابط (۲) تا (۵) در این دو حالت بسیار متفاوت است. ضریب اطمینان از مقدار صفر در حالت (۱) تا حد ۵۴٪ در حالت (۲) افزایش می یابد؛ برگشت پذیری نیز از صفر درصد در حالت (۱) به مقدار ۱۰۰ درصد در حالت (۲) می رسد. به همین ترتیب براساس رابطه (۴)، معیار آسیب پذیری در حالت (۱) از مقدار ۴۵ درصد به ۹۸ درصد در حالت (۲) می رسد. در نهایت شاخص پایداری سیستم برای این دو حالت دارای عملکرد بسیار نزدیک هستند از مقدار صفر درصد در مثال (۱) به بیش از ۲۲ درصد در حالت (۲) می رسد. این بدان دلیل است که هرگاه تأمین نیاز به طور کامل صورت بگیرد براساس رابطه (۱) این رخداد به عنوان دوره بدون کمبود یا موفقیت در نظر گرفته می شود ولی هرگاه تأمین نیاز به طور کامل صورت نگیرد این رخداد به عنوان دوره دارای کمبود یا شکست در نظر گرفته می شود؛ چه کمبود بسیار ناچیز باشد و چه به اندازه کل نیاز. استفاده از سیستم دودویی یا منطق کلاسیک باعث عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت و به عبارتی دیگر میزان رضایتمندی متناسب با مقدار کمبود در هر رخداد می شود. این مهم حکایت از آن دارد که روابط ارائه شده نمی توانند نتایج قابل اعتماد و محسوسی را جهت تصمیم گیری و تخمین شاخص پایداری به خصوص در مقادیر حدی از عملکرد سیستم نسبت به نیاز ارائه دهند.

منطق فازی که اولین بار توسط Zadeh (1965) ارائه شد شکل تعمیم یافته منطق کلاسیک است که در آن درستی گزاره ها می تواند در محدوده صفر و یک تغییر کند و بدین ترتیب امکان استدلال تقریبی فراهم می گردد. تابع عضویت، مقدار فازی بودن یک مجموعه فازی را نشان می دهد که بنا به اهداف مختلف در تحقیقات می توان

از توابع عضویت گوناگونی همچون تابع عضویت مثلثی، دوزنقه ای، گوسین، سیگموئید و زنگوله ای در محاسبات فازی استفاده نمود. توابع عضویت گوسین و زنگوله ای تنها توابع عضویتی هستند که در هیچ نقطه ای به جز در مثبت و منفی بینهایت صفر نمی شوند. مقادیر صفر در محاسبات فازی می تواند منجر به عدم در نظر گرفتن بسیاری

پارامترهای دیگر در طول محاسبات شوند؛ در واقع این توابع در لحاظ کردن عدم قطعیت در کل بازه ی مورد مطالعه از قدرت بیشتری نسبت به دیگر توابع عضویت برخوردار هستند؛ همچنین به علت اینکه تابع عضویت زنگوله ای دارای یک پارامتر بیشتر از تابع گوسین است، انعطاف پذیری آن در برابر تعریف اشکال مختلف تابع عضویت بنابه نظر کارشناس خبره بیشتر می باشد (Sumathi and Paneerselvam, 2010). این ویژگی ها از مهم ترین دلایل استفاده از تابع عضویت زنگوله ای و کاربرد وسیع آن در اکثر مطالعات منابع آب به خصوص در چند سال اخیر می باشد. این تابع به صورت زیر تعریف می شود:

$$\mu(x) = bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (2)$$

با استفاده از پارامترهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  می توان سطوح مختلفی از رضایتمندی در شرایط مختلف را ایجاد نمود. این پارامترها می توانند در شرایط مختلف و بر اساس نظرات کارشناسان خبره تعیین شوند؛ علاوه بر این، می توان برای هر نیاز یا منبع توابع عضویت متفاوتی را تعریف نمود.

برای توسعه روابط مربوط به معیارهای عملکرد بر اساس تئوری فازی، در ابتدا باید یک تابع مطلوبیت تعریف شود. این تابع بیان کننده این مفهوم است که هرچه مقدار تأمین یا عرضه به نیاز یا تقاضا نزدیک تر شود مطلوبیت و رضایتمندی از عملکرد سیستم بالاتر خواهد رفت. براساس هدف این تحقیق که در آن درصدهای تأمین بیشتر دارای مطلوبیت بیشتر خواهند بود، بنابراین پارامترهای این تابع باید به صورت شکل S تعریف شوند. براساس آنچه در تحقیقات El-Baroudy and Simonovic (2004) ارائه شد، حالات مختلف مطلوبیت سیستم می تواند در حالت ریسک بالا، حالت رضایت بخش و حالت رضایتمندی زیاد باشد. علاوه بر ویژگی های تابع عضویت زنگوله ای، چنانچه این تابع به صورت S تعریف شود، می تواند در مقادیر درصدهای بالا از تأمین نیاز، در حالت رضایتمندی زیاد، برای درصدهای تأمین پایین در حالت ریسکی و برای درصدهای بین این دو، در حالت رضایت بخش عمل کند. در این تحقیق، براساس نظر کارشناسان بهره برداری آب منطقه ای اصفهان تابع زنگوله ای با توجه به رابطه (۷) به صورت  $bell(x; a, b, c) = bell(x; 30, 2, 100)$  به عنوان نماینده تابع عضویت فازی مطلوبیت سیستم انتخاب شد (شکل ۱) که در آن  $x$  درصد تأمین نیاز می باشد. این تابع می تواند در شرایط مختلف برنامه ریزی، مدیریت و تصمیم گیری متفاوت بوده و براساس نظرات کارشناسان خبره و ذینفعان برای هر نیاز یا منبع به طور جداگانه تعیین شود. همچنین همانند آنچه در مورد رابطه (۱) در



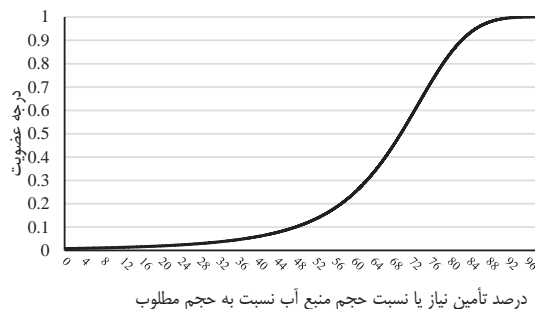
$$Vul^j = \max_x (1 - \mu^j(x_i)); 0 \leq Vul^j \leq 100\% \quad (10)$$

با محاسبه روابط (۷) تا (۹) برای حالت‌های (۱) و (۲) از مثال فرضی، قابلیت اطمینان برابر ۵۴/۲۵ درصد، برگشت‌پذیری برابر ۱۰۰/۰۰ و آسیب‌پذیری برابر ۹۹/۱۳ درصد برای هر دو حالت به دست می‌آیند. نتایج بیان‌گر آن است که روابط جدید ضمن ارائه مقادیر منطقی و محسوس برای معیارهای عملکرد، مقادیر حدی سیستم را نیز تشخیص داده و متناسب با مطلوبیت عملکرد سیستم رفتار می‌کند. در واقع خروجی این روابط برای حالت‌های (۱) و (۲) برای کارشناس یا متخصص منابع آب، ملموس‌تر و محسوس‌تر است. در نهایت مقدار شاخص پایداری سیستم در هر دو مثال با استفاده از معیارهای عملکرد فازی، برابر ۱۶/۷۷ درصد به دست می‌آید که مقایسه آن با مقادیر محاسبه‌شده از معیارهای عملکرد کلاسیک در جدول ۲، نمایانگر آن است که روابط فازی برای هر دو حالت، واقعیت مشهود و ملموس از عملکرد سیستم (که همانا عملکرد بسیار نزدیک سیستم در دو حالت مذکور است) را به خوبی و با قابلیت اعتماد مناسب‌تری به صورت کمی ارائه می‌کند.

### ۳- مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود

حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحتی حدود ۲۶۹۷۲ کیلومتر مربع، یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز کشور است که در مرکز ایران قرار داشته و از نظر تأمین نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست در ایران مرکزی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (Sally et al., 2000). این حوضه از شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از شرق به حوضه‌های دق سرخ و کویر سیاه‌کوه، از جنوب به حوضه کویر ابرقو و از غرب و جنوب به حوضه آبریز کارون و تا حدودی حوضه آبریز بختگان-مهارلو محدود می‌شود (Zayandab Consulting, 2008). مرتفع‌ترین نقطه حوضه، کوه کربوش با ارتفاع ۳۹۷۴ متر از سطح دریا و کم ارتفاع‌ترین نقطه حوضه، تالاب گاوخونی با ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد (Tavakoli, 2011). این حوضه آبریز یک حوضه کاملاً بسته به شمار آمده و هیچ خروجی به دریاهای آزاد ندارد و به عنوان پرآب‌ترین رودخانه ایران مرکزی شناخته می‌شود. با این وجود، مدیریت منابع آب در این حوضه با موجهی از مناقشات، اختلافات، ناسازگاری‌ها بین بخش‌های مختلف آن روبرو است. نیاز شرب و بهداشت و نیاز صنایع بزرگی چون صنایع فولاد، کارخانجات سیمان، نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی که غالباً نیاز عمده کشور را تأمین می‌کنند در مقابل نیاز آبی کشاورزی همگی از اهمیت بالایی در این حوضه برخوردار هستند (Mamanpoush et al., 2000). از طرف دیگر، بر اساس کنوانسیون بین‌المللی رامسر، تالاب گاوخونی در پی تغییرات اقلیم و خشکسالی‌های پی‌درپی، مقدار آب لازم جهت حفظ اکوسیستم خود را

خصوص منابع آب اشاره شد، مطلوبیت مقادیر  $x$  بالاتر از ۱۰۰ درصد، برابر ۱ خواهد بود.



شکل ۱- تابع عضویت زنگوله‌ای تعریف‌شده جهت تعیین مطلوبیت عملکرد سیستم

براساس این تابع، مقدار مطلوبیت عملکرد سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. به طور مثال براساس تابع عضویت انتخاب‌شده، چنانچه ۸۵ درصد نیاز تأمین گردد مطلوبیت به اندازه ۰/۹۴ خواهد بود و طبعاً عدم مطلوبیت یعنی متمم این مقدار برابر ۰/۰۶ خواهد بود. در صورتی که اگر طبق رابطه (۱) عمل شود خروجی این خواهد بود که تأمین این مقدار از نیاز به هیچ وجه مطلوب کاربر نبوده و عملکرد سیستم با توجه به روابط معیارهای عملکرد صددرصد نامطلوب ارزیابی می‌شود. حال بر اساس این تابع عضویت و جایگزین کردن آن به جای تابع کلاسیک ( $D_i^j$ ) و بهره‌گیری از مفهوم روابط مربوط به قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری که برپایه دیدگاه احتمالاتی توسعه داده شده‌اند، روابط جدیدی وابسته به درجه مطلوبیت حاصل از تابع عضویت، توسعه یافته‌است. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر معیار آسیب‌پذیری فازی، براساس مفهوم رابطه (۵) توسعه داده شده‌است.

اگر مقادیر  $\mu^j(x_i)$  مشخص‌کننده میزان مطلوبیت سیستم در تأمین نیاز مصرف‌کننده زام در گام زمانی  $t$  باشد (که مقدار آن با استفاده از تابع عضویت انتخاب‌شده محاسبه می‌شود)؛ و  $1 - \mu^j(x_i)$  تعیین‌کننده میزان نامطلوب بودن عملکرد سیستم برای آن باشد بنابراین قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری سیستم را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$Re l^j = \frac{\sum \mu^j(x_i)}{N} \times 100\%; \quad (8)$$

$$0 \leq Re l^j \leq 100\%$$

$$Re s^j = \frac{\sum (\mu^j(x_i) - \mu^j(x_{i-1}) | \mu^j(x_i) > \mu^j(x_{i-1}))}{\sum (1 - \mu^j(x_i))} \times 100\%; \quad (9)$$

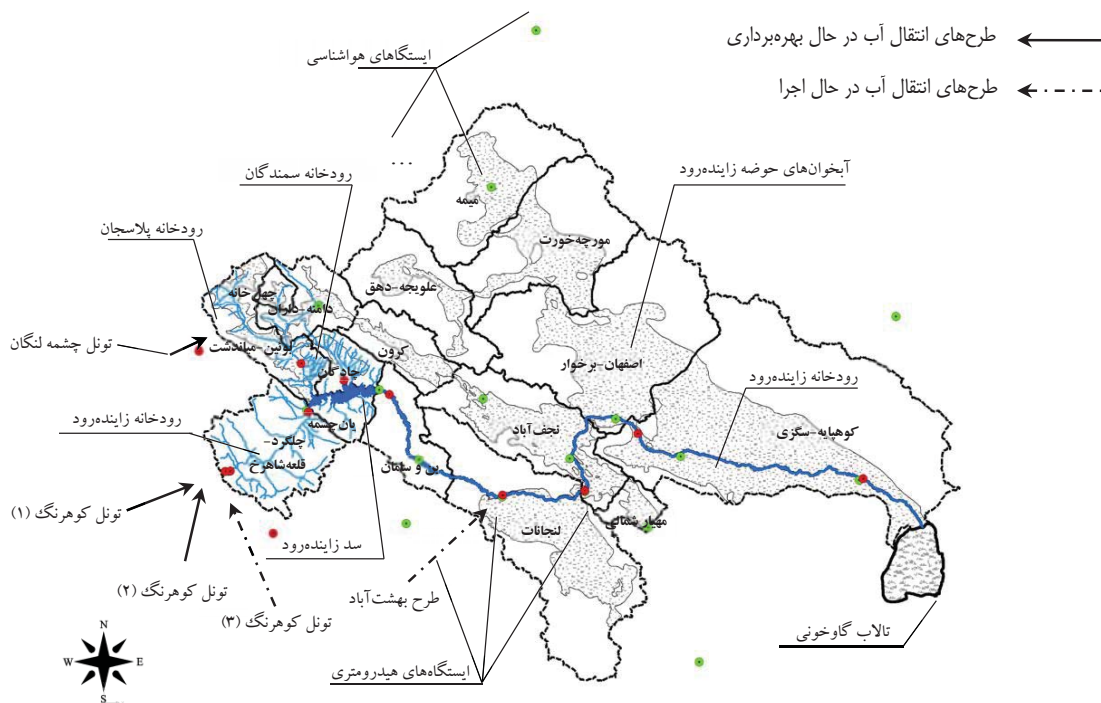
$$0 \leq Re s^j \leq 100\%$$

دریافت نکرده و این امر منجر به نابودی این تالاب شده است (Ramsar Convention, 1971; Navid, 1989). رودخانه زاینده‌رود با طول حدود ۳۶۰ کیلومتر از ارتفاعات زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و نهایتاً با عبور از شهر اصفهان به تالاب گاوخونی ختم می‌گردد و امتدادی تقریباً غربی-شرقی دارد (Molle et al., 2009). سرچشمه‌های رودخانه زاینده‌رود در فاصله ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان به سد مخزنی زاینده‌رود وارد می‌شوند. به علت وجود منابع آب سطحی و زیرزمینی مختلف و اندرکنش بین آن‌ها برای تأمین انواع مصارف همچون شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست این حوضه به عنوان حوضه‌ای با هیدروسیستم پیچیده شناخته می‌شود (Madani and Mariño, 2009). براساس آخرین تقسیمات، این حوضه از ۱۶ زیرحوضه اصلی تشکیل شده‌است که شش تای آن در بالادست سد زاینده‌رود و مابقی در پایین‌دست آن قرار دارند. شکل ۲، حوضه آبریز زاینده‌رود، زیرحوضه‌ها و آبخوان‌های حوضه، موقعیت رودخانه زاینده‌رود و سرشاخه‌های اصلی آن و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی مورد استفاده در مدل‌سازی تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- منابع آب حوضه آبریز زاینده‌رود

منابع آب سطحی: سه رودخانه زاینده‌رود، پلاسجان و سمندگان از شاخه‌های اصلی رودخانه زاینده‌رود هستند. براساس آمار ۲۱-ساله از

سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰، حدود ۸۷٪ آورد آن‌ها مربوط به شاخه اصلی زاینده‌رود، ۱۲٪ مربوط به رودخانه پلاسجان و کمتر از ۱٪ آورد رودخانه سمندگان است (Safavi et al., 2015). دو رودخانه زاینده‌رود (شاخه اصلی بالادست) و رودخانه پلاسجان در پایین‌دست ایستگاه قلعه‌شاهرخ به هم پیوسته و وارد سد زاینده‌رود می‌شوند. همچنین رودخانه سمندگان نیز بلافاصله بعد از ایستگاه مندرجان مستقیماً به مخزن سد زاینده‌رود می‌ریزد. در پایین‌دست سد زاینده‌رود رودخانه‌های فصلی از جمله مرغاب و شور وجود دارند که به رودخانه زاینده‌رود می‌ریخته‌اند؛ اما در دهه‌های اخیر هم به علت خشکسالی‌های پایی و هم به دلیل طرح‌های آبخیزداری و بندها و انحراف این آب‌ها، عملاً آب این رودخانه‌های فصلی به رودخانه زاینده‌رود نمی‌ریزد، بنابراین در مطالعات از اهمیت زیادی برخوردار نیستند (Molle et al., 2009). در مقابل در پایین‌دست سد زاینده‌رود تغذیه آبخوان از بارش و رودخانه و اندرکنش بین رودخانه و آبخوان‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (DHI-WASY, 2014). تونل اول کوه‌رنگ اولین پروژه انتقال آب از حوضه آبریز کارون به حوضه آبریز زاینده‌رود است که در سال ۱۳۳۲ با ظرفیت میانگین سالانه حدود ۳۴۰ میلیون مترمکعب احداث شد (Gohari et al., 2013). احداث سد مخزنی زاینده‌رود در سال ۱۳۴۹ با ظرفیت ۱۴۷۰ میلیون مترمکعب تحول بزرگی در حوضه و بهره‌برداری از منابع آب ایجاد کرد (Molle et al., 2009).



شکل ۲- حوضه آبریز زاینده‌رود و زیرحوضه‌ها، آبخوان‌ها و مشخصات کلی آن

تونل دوم کوه‌رنگ و تونل ماربران با ظرفیت انتقال میانگین سالانه حدود ۲۵۰ میلیون مترمکعب، در سال ۱۳۶۵ جهت انتقال بخش دیگری از آب‌های حوضه آبریز کارون به حوضه زاینده‌رود احداث گردید (Sally et al., 2000). همچنین تونل چشمه‌لنگان از سال ۱۳۸۸ جهت انتقال آب میانگین سالانه حدود ۱۶۴ میلیون مترمکعب از حوضه آبریز دز به بهره‌برداری رسید (Gohari et al., 2013). تونل سوم کوه‌رنگ نیز جهت انتقال آب از حوضه کارون در حال اتمام است. این تونل با ظرفیت میانگین سالانه حدود ۲۶۸ میلیون مترمکعب و به طول ۲۳۴۰۹ متر ساخته شده و به‌طور موقت با پمپاژ آب به درون تونل از سال ۱۳۹۳ به بهره‌برداری رسیده‌است. همچنین طرح انتقال آب بهشت‌آباد نیز در دست اقدام است. در این طرح قرار است حجم آبی حدود ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال از حوضه آبریز کارون به زاینده‌رود در بالادست ایستگاه هیدرومتری پل کله منتقل نماید (Tavakoli, 2011).

**منابع آب زیرزمینی:** منابع آب زیرزمینی از منابع بسیار مهم و حیاتی حوضه آبریز زاینده‌رود به شمار می‌آیند که از طریق چاه‌ها، قنات و چشمه‌ها بهره‌برداری می‌شوند. در کل محدوده مطالعاتی حوضه آبریز زاینده‌رود از ۱۶ محدوده مطالعاتی، ۱۳ زیرحوضه دارای آبخوان‌های آب زیرزمینی به صورت فعال می‌باشند. آبخوان‌های سه زیرحوضه چلگرد-قلعه‌شاهرخ، بان چشمه و بن و سامان به علت قرارگرفتن در مناطق کوهستانی و ضخامت آبرفت بسیار ناچیز عملاً در محاسبات حوضه از اهمیت بسیار کمی برخوردار هستند و به همین علت آبخوان‌های آنها غیرفعال در نظر گرفته می‌شوند. از ۱۳ آبخوان فعال در حوضه، ۴ آبخوان لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگزی به سه دلیل از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند؛ (۱) وجود عمده مصارف حوضه اعم از شرب و بهداشت، صنعت، کشاورزی و محیط زیست در این محدوده‌ها (۲) بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی (رودخانه) و آب زیرزمینی در این نواحی و (۳) اندرکنش بین رودخانه و آبخوان‌های این محدوده‌های مطالعاتی. همچنین آبخوان‌های محدوده‌های مطالعاتی دامنه-داران و بوبین-میاندهشت در بالادست سد زاینده‌رود نیز به دلیل تأثیرگذاری بالا بر دبی رودخانه پلاسجان از اهمیت بیشتری نسبت به دیگر آبخوان‌ها در بالادست سد برخوردار هستند.

### ۳-۲- مصارف آب در حوضه آبریز زاینده‌رود

به طور کلی چهار مصرف عمده در حوضه آبریز زاینده‌رود وجود دارد که عبارتند از: مصارف شرب و بهداشت، زیست‌محیطی (تالاب گاوخونی)، صنعت و کشاورزی. مصارف آب شرب و بهداشت را در این حوضه می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد: (۱) آب شرب

کلان‌شهر اصفهان و شهرهای اطراف آن (۲) مصارف شرب دیگر شهرهای واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود که نیاز خود را از رودخانه یا منابع آب زیرزمینی برداشت می‌کنند (۳) آب‌های انتقالی به شهرهای خارج از حوضه از جمله یزد و کاشان. در این حوضه بجز اصفهان حدود ۲۰ شهر و ۲۰۰ روستا وجود دارد که آب مورد نیاز خود را از رودخانه یا آب‌های زیرزمینی برداشت می‌کنند. طرح آبرسانی اصفهان بزرگ نیز بر مبنای ظرفیت ۱۲/۵ مترمکعب در ثانیه در حال بهره‌برداری می‌باشد.

در بخش زیست‌محیطی تالاب گاوخونی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین بخش حوضه می‌باشد. بر اساس مطالعاتی که توسط (Sarhadi and Soltani, 2013) انجام شد تالاب گاوخونی جهت بقای پرندگان در ماه‌های بحرانی، به طور متوسط سالانه نیازمند حداقل حدود ۶۰ میلیون مترمکعب آب می‌باشد. ولی جهت حفظ و بقای اکوسیستم تالاب، به طور متوسط حداقل حجم آبی حدود ۱۴۲ میلیون مترمکعب آب در سال نیاز است. در بخش صنعت، استان اصفهان به عنوان یکی از قطب‌های بزرگ و مهم صنعتی کشور می‌باشد. رشد سریع صنعت در سه دهه اخیر به‌ویژه صنایع فولاد، صنایع نظامی، سیمان، الیاف مصنوعی، صنایع پتروشیمی، پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها، این منطقه را به یک منطقه صنعتی تبدیل نموده است. در حال حاضر بالغ بر ۱۳۰۰۰ واحد صنعتی در حوضه آبریز زاینده‌رود فعال می‌باشند که بر اساس آمار سال آبی ۱۳۸۵، سالانه حدود ۱۵۲ میلیون مترمکعب آب را به خود اختصاص می‌دهند (Inter3, 2013). در کنار صنایع متعدد کوچک که بخش اندکی از مصارف صنعت را شامل می‌شوند، مصرف‌کنندگان بزرگ عمدتاً از بخش‌های فولاد، پتروشیمی و نیروگاهی دارای مصارف بسیار بالایی از آب هستند. بخش کشاورزی عمده‌ترین و اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب در حوضه آبریز زاینده‌رود است که بر اساس آمار دوره مطالعاتی (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰)، حدود ۸۵٪ مصارف آب در حوضه را به خود اختصاص می‌دهد (Safavi et al., 2015). عمده آب کشاورزی در حوضه توسط کانال‌های مهیار-جرقویه، نکوآباد چپ و راست، آبشار چپ و راست و رودشت شمالی و جنوبی تأمین و توزیع می‌شود. جدول ۳ مصارف آب در حوضه آبریز زاینده‌رود را همراه با منابع تأمین آن‌ها ارائه می‌دهد. به غیر از نیاز شرب و بهداشت، آمار بقیه مصارف بر اساس سال آبی ۱۳۸۵ می‌باشد. این دوره از نظر کارشناسان، یکی از دوره‌های نرمال در حوضه آبریز زاینده‌رود است که بهترین سال از لحاظ سطوح زیرکشت، وضعیت منابع آب و تخصیص آن‌ها به مصارف به شمار می‌رود. آمار مصارف آب در بخش شرب و بهداشت مربوط به سال آبی ۱۳۸۹ می‌باشد که می‌تواند مبین بیشترین ظرفیت تأمین و نیاز آب شرب در حوضه باشد.



جدول ۳- منابع و مصارف خالص آب در حوضه آبریز زاینده رود

تأمین از منابع	نیاز خالص آب	سال آبی مینا	ذینفع یا کاربر آب
میلیون مترمکعب	میلیون مترمکعب	میلیون مترمکعب	
۲۷	۴۰۲	۴۲۹	شرب و بهداشت
۰	۱۴۲ (۶۰)	۱۴۲ (۶۰)*	محیط زیست (تالاب گاوخونی)
۱۴	۹۸	۱۱۲**	صنعت
۱۳۸۴	۱۰۱۶	۲۴۰۰	کشاورزی
۱۴۲۵	۱۶۵۸ (۱۵۷۶)	۳۰۸۳ (۳۰۰۱)	جمع

\* در مواقع کم آبی جهت بقای پرندگان ۶۰ میلیون متر مکعب و جهت حفظ و بقای اکوسیستم ۱۴۲ میلیون مترمکعب نیاز آبی در نظر گرفته می شود.  
\*\* نیاز واقعی صنعت حدود ۱۵۲ میلیون مترمکعب است که مابقی از ۱۱۲ میلیون مترمکعب در نیاز شرب در نظر گرفته شده است.

تلفیق شدند. سپس با استفاده از IFS اصلاح شده پس از محاسبه اندرکنش بین رودخانه و آبخوانها، کالیبراسیون مدل برای سالهای آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۶ انجام شد. سپس اعتبارسنجی مدل با استفاده از مدل انفیس توسعه داده شده جهت مدل سازی جریانهای طبیعی در حوضه برای ۴ سال دیگر از دوره مطالعاتی یعنی سال آبی ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۰ انجام شد. ارزیابی مدل در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی بر اساس معیارهای خطای ضریب تبیین یا  $R^2$  (Steel and Torrie, 1960) و ضریب تطابق یا d (Willmott et al., 1985) و ضریب تأثیر ناش-ساتکلیف یا E (Nash and Sutcliffe, 1970) جهت مقایسه خروجیهای مربوط به حجم مخزن سد، دبی ایستگاههای هیدرومتری، تغییرات سطح یا حجم آبخوانها و میزان تخصیص مدل به هریک از مصارف انجام گردید. نتایج معیارهای خطا هم از نظر مقدار خطا و هم از نظر مطالعات (Moriasi et al., 2007) حاکی از عملکرد بسیار خوب مدل داشت که نشان دهنده آن است که مدل توسعه یافته می تواند بستری مناسب برای تحقیقات و مطالعات مختلف برنامه ریزی و مدیریت در حوضه باشد. سپس با استفاده از مدل انفیس<sup>۳۱</sup> توسعه داده شده و پیش بینی دادههای بارش و دما در سناریوهای تغییر اقلیم (WWRI-IUT, 2014)، جریانهای طبیعی حوضه به خصوص جریانهای رودخانههای بالادست حوضه که مهم ترین منابع آب سطحی حوضه به شمار می آیند شبیه سازی شده و با بارگذاری دادههای مربوط به جریانهای طبیعی و مصارف در مدل برنامه ریزی، سناریوهای مختلف در حوضه، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند. دوره شبیه سازی سناریوها به جهت واقع بینانه و اجرایی بودن آنها از نظر مدیریتی و سیاسی، برای یک دوره ۵ ساله (از سال آبی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹) با عنوان آینده نزدیک در نظر گرفته شد.

در این تحقیق از خروجیهای سناریوی روند مربوط به وضعیت سطح آب در مخزن سد زاینده رود و چهار آبخوان لنجانان، نجف آباد، اصفهان-برخوار و کوهپایه-سگزی و مقدار آب تأمین شده در مصارف شرب، صنعت، کشاورزی و تالاب گاوخونی برای آینده نزدیک

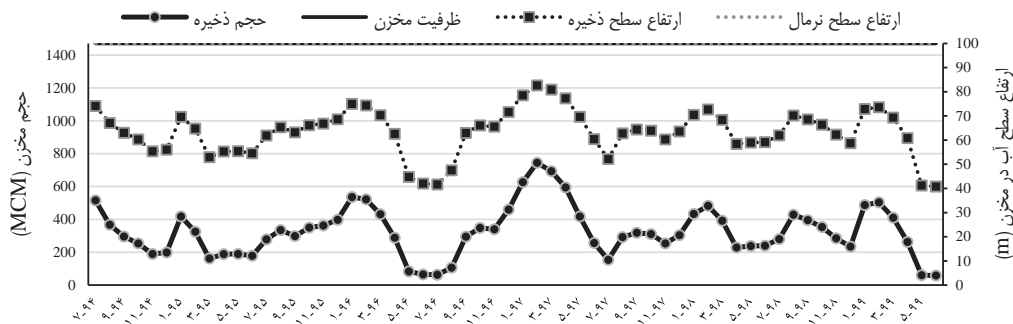
برخلاف منابع آب سطحی در حوضه که تا حد زیادی قابل کنترل می باشند، منابع آب زیرزمینی تا حد وسیعی غیرقابل کنترل هستند. وجود چاههای غیرمجاز و غیرقابل کنترل بسیار در حوضه به خصوص در نواحی حریم رودخانه زاینده رود، همچنین کف شکنیهای غیرمجاز در مواقع خشکسالی و کمبود آب، منابع آب زیرزمینی در حوضه را با چالشها و خسارات جدی و بعضاً غیرقابل جبران روبرو کرده است. هرگاه کاربران با کمبود آب سطحی مواجه می شوند به برداشت های بی رویه و خارج از مجوز برای جبران کمبودها دست می زنند و اینها حکایت از عدم کنترل مناسب بر برداشت ها از منابع آب زیرزمینی در این حوضه دارند.

### ۳-۳- مدل سازی جامع منابع و مصارف آب در حوضه آبریز زاینده رود

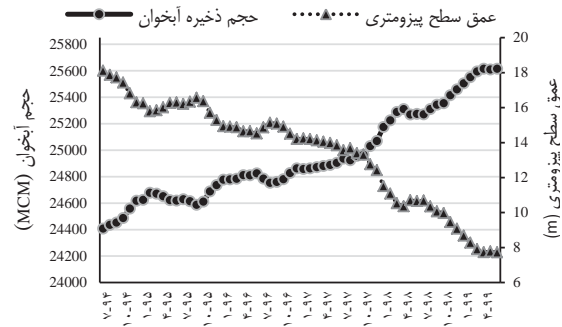
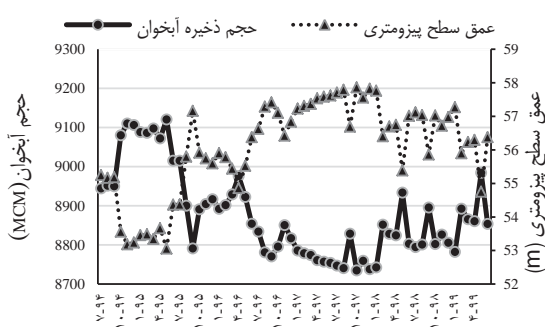
بر اساس نظر محققان و صاحب نظران مدیریت منابع آب، مدل سازی یکی از مهم ترین گامهای اجرای مدیریت جامع منابع آب است (Dukhonvy and Sokolov, 2005). (Safavi et al., 2015) هدف تحلیل سناریوهای برنامه ریزی و مدیریت جامع منابع آب در حوضه آبریز زاینده رود و با بهره گیری از پتانسیل های علمی و تجربی موجود در حوضه، مدل برنامه ریزی جامع منابع آب حوضه را با استفاده از ابزار WEAP توسعه دادند؛ در تحقیقات آنها مدل برنامه ریزی زاینده رود با استفاده از دادهها و اطلاعات حوضه در طول ۲۱ سال دوره مطالعاتی (از سال آبی ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۰) و با در نظر گرفتن عدم قطعیت های مختلف ناشی از عدم شناخت پارامترها و عدم وجود داده و یا وجود داده های ناقص از پارامترهای شناخته شده در دو بخش آب سطحی و زیرزمینی توسعه داده شد. سپس با استفاده از روش IFS<sup>۳۲</sup> (Danner et al., 2006) و روش ارائه شده در آن تحقیق، اندرکنش بین رودخانه و آبخوان های تحت تأثیر آن محاسبه گردیده و با در نظر گرفتن نرخ نفوذ از بارش، برداشت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و ملاحظه آب برگشتی از مصارف مدل آب سطحی و مدل آب زیرزمینی با یکدیگر

جدول ۴- وضعیت مطلوب ماهانه آبخوان‌های مورد مطالعه در طول یک سال آبی

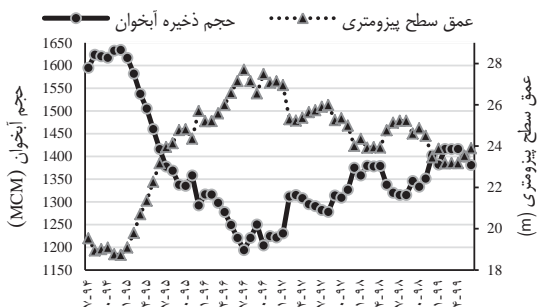
شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	دی	آذر	آبان	مهر	سد زاینده‌رود	سطحی (MCM)	آبخوان
۷۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۶۵۰	۶۰۰	۶۵۰	۷۰۰	کوهپایه-سگری	عمق پیزومتری (m)	
۱۵	۱۵	۱۶	۱۶	۱۶	۱۵	۱۵	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	اصفهان-برخوار		
۵۳	۵۳	۵۳	۵۱	۵۲	۵۲	۵۱	۵۲	۵۲	۵۳	۵۳	۵۳	نجف‌آباد		
۲۵	۲۵	۲۵	۲۵	۲۴	۲۴	۲۳	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۵	لنجانات		



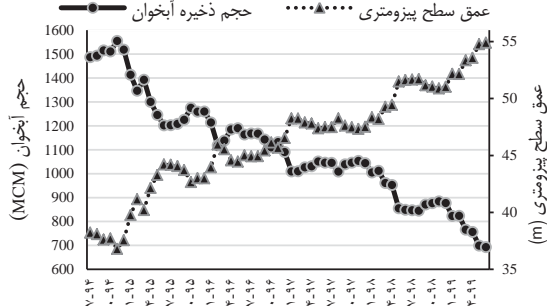
شکل ۳- عملکرد مخزن سد زاینده‌رود در مدل برنامه‌ریزی در سناریوی روند



(ب) آبخوان اصفهان-برخوار



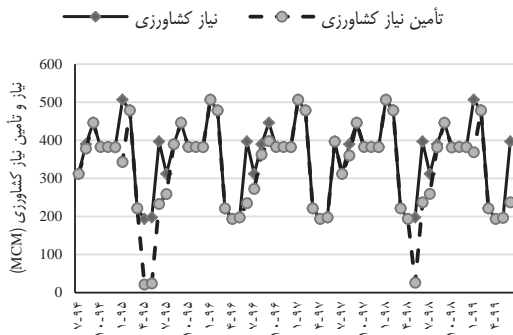
(الف) آبخوان کوهپایه-سگری



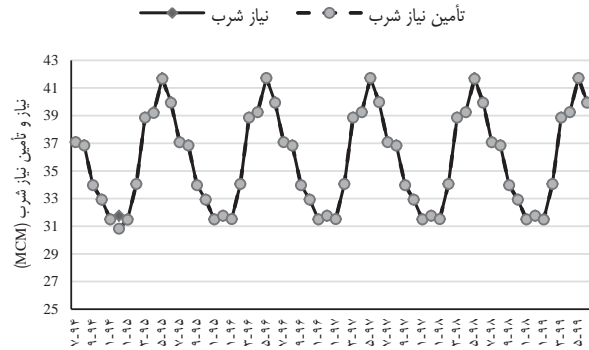
(د) آبخوان لنجانان

(ج) آبخوان نجف‌آباد

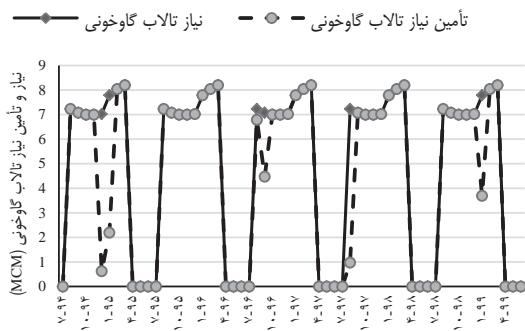
شکل ۴- عملکرد چهار آبخوان اصلی در مدل برنامه‌ریزی در سناریوی روند



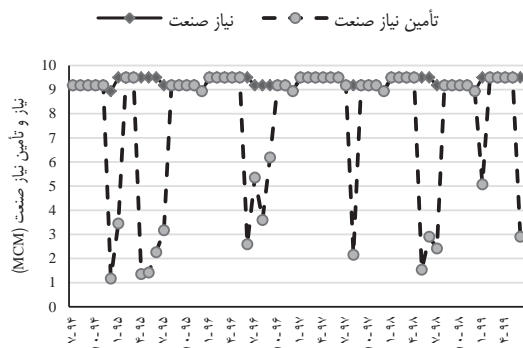
ب) نیاز و تأمین نیاز کشاورزی



الف) نیاز و تأمین نیاز شرب و بهداشت



د) نیاز و تأمین نیاز محیط زیست



ج) نیاز و تأمین نیاز صنعت

شکل ۵- عملکرد مدل در تخصیص آب به چهار گروه اصلی نیاز در حوضه زاینده رود در سناریوی روند

از سال آبی ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹) جهت مقایسه معیارهای عملکرد حاصل از روابط قبلی و روابط فازی توسعه داده شده در تحقیق حاضر استفاده شده است. شکل‌های ۳ تا ۵ خروجی مدل برنامه‌ریزی زاینده رود برای وضعیت منابع و تأمین نیازها را تحت سناریوی روند نسبت به وضعیت مطلوب به صورت ماهانه نشان می‌دهد.

از نظر کارشناسان حوضه وضعیت مطلوب منابع حوضه می‌تواند همان وضعیت منابع در سال آبی ۱۳۸۶ در نظر گرفته شوند. وضعیت مطلوب منابع آب مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. متغیر  $x$  مربوط به تابع عضویت زنگوله‌ای (رابطه ۷)، برای این آبخوان‌ها برابر با نسبت حجم آبخوان یا مخزن به حجم مطلوب آن می‌باشد. با استفاده از فایل رستر DEM و سنگ کف آبخوان‌ها، احجام ماهانه آبخوان‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و ایجاد یک مدل تکرار در توبلاکس ModelBuilder محاسبه شده است. همچنین به همین روش و با استفاده از مقادیر عمق سطح پیرومتری مطلوب ارائه شده در جدول ۴، احجام مطلوب از این آبخوان‌ها محاسبه شده‌اند. بدین ترتیب در هر ماه مقدار متغیر  $x$  برای هر آبخوان محاسبه شده و با استفاده از نمودار شکل ۱ و یا رابطه (۷) با ضرایب

میزان مطلوبیت حجم موجود از آبخوان محاسبه شده است. روشن است که مقادیر حجم بیشتر از حجم مطلوب دارای مطلوبیت مطلق بوده و مقدار آن در تابع برابر ۱ خواهد بود. در نهایت برای کل دوره مورد مطالعه، محاسبات معیارهای عملکرد و شاخص پایداری انجام شده است. بدیهی است که در مورد نیاز وضعیت مطلوب تأمین نیاز در حوضه همان مقدار نیاز یا تقاضا در مصارف مختلف می‌باشد. جهت بررسی دقیق‌تر مدل و خروجی‌های آن در سناریوی روند، توضیحات کامل در (Safavi et al. 2015) ارائه شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

پس از تعیین خروجی‌های مدل برای وضعیت منابع سطحی و زیرزمینی مورد مطالعه و مقادیر تأمین نیاز براساس شکل‌های ۲ تا ۵ و مقایسه آن‌ها با وضعیت مطلوب منابع و تأمین نیازها و با استفاده از معیارهای قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری می‌توان به ارزیابی عملکرد سیستم برنامه‌ریزی حوضه تحت شرایط سناریوی روند پرداخت. همچنین با جمع‌بندی این معیارها توسط شاخص پایداری می‌توان وضعیت سیستم را از لحاظ پایداربودن منابع و تأمین

مصارف مورد بررسی قرار داد. جدول ۵ نتایج حاصل مربوط به معیارهای عملکرد و شاخص پایداری با استفاده از روش کلاسیک و روش ارائه شده در تحقیق حاضر در ارزیابی منابع آب سطحی و زیرزمینی و همچنین تأمین نیازهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مهم‌ترین نتیجه حاصل از مقایسه معیارهای عملکرد کلاسیک و فازی آن است که زمانی که تفاوت بسیار زیادی بین مقادیر حاصل از آن‌ها به خصوص در مورد معیارهای قابلیت اطمینان و برگشت‌پذیری مشاهده شود بیانگر آن است که وضعیت منبع در حالت حدی از وضعیت مطلوب قرار داشته‌است؛ و یا تقاضا در حالت حدی تأمین شده‌است. این مهم در مورد آبخوان اصفهان-برخورار به وضوح قابل مشاهده است. قابلیت اطمینان حاصل از روش قبل صفر و از روش فازی ۱۰۰ درصد است.

با توجه به جدول ۴ عمق مطلوب پیرومتری در اصفهان-برخورار حدود ۵۳ متر می‌باشد و با توجه به ضخامت متوسط آبخوان که حدود ۱۶۶ متر است (Safavi et al., 2015) عمق پیرومتری حدود ۲ تا ۳ متر از مقدار مطلوب پائین‌تر می‌باشد. با توجه به تابع عضویت تعریف‌شده، این مقدار تفاوت از نظر کارشناسان دارای مطلوبیت بالا بوده و به همین دلیل مقدار قابلیت اطمینان در سطح بالایی ارزیابی شده‌است. آبخوان‌های کوهپایه-سگزی و اصفهان-برخورار در حوضه آبریز زاینده‌رود آبخوان‌های با شرایط خاص هستند که با جریان آب در رودخانه زاینده‌رود سطح آب تا حد زیادی در آن‌ها افزایش یافته و عدم جریان در رودخانه باعث افت بالای این آبخوان‌ها می‌شود.

بنابراین افت دو تا سه متری آب در این آبخوان نسبت به سطح مطلوب با توجه به تابع عضویت تعریف‌شده، ناچیز ارزیابی شده‌است. به دلیل صفربودن قابلیت اطمینان در این آبخوان با استفاده از روش کلاسیک، پایداری در این روش صفر درصد ارزیابی شده‌است در حالی که پایداری با استفاده از معیارهای عملکرد فازی در این تحقیق بیش از ۶۷ درصد ارزیابی شده‌است. این تفاوت ارزیابی‌ها در روش کلاسیک و فازی در آبخوان لنجانان نیز تا حدی مشاهده می‌شود ولی به هرحال پایداری حاصل از روش فازی نیز برای این آبخوان بسیار کم می‌باشد که حاکی از آن است که چنانچه وضعیت برداشت‌ها در این آبخوان همانند وضعیت موجود باشد (سناریوی روند)، این آبخوان وضعیت بسیار نامطلوبی خواهد داشت. در آبخوان نجف‌آباد مشاهده می‌شود که ارزیابی حاصل از هر دو روش مقادیر بسیار نامطلوبی را نشان می‌دهد که بیانگر وضعیت بسیار حساس این آبخوان می‌باشد.

در بخش مصارف، همان‌طور که در شکل (۵-الف) مشاهده می‌شود، تأمین نیاز شرب نسبت به نیاز تا حد بسیار مطلوبی انجام شده‌است ولی در برخی موارد این تأمین نیاز در مقادیر بسیار حدی از نیاز قرار داشته و به همین دلیل روش کلاسیک اطمینان‌پذیری حدود ۷۳ درصد و برگشت‌پذیری حدود ۳۷ درصد را ارائه می‌دهد در حالی که آنچه در واقعیت عملکرد سیستم مشاهده می‌شود آن است که این نیاز در حد بسیار خوبی تأمین شده‌است (شکل ۵-الف) که معیارهای عملکرد فازی این واقعیت را به خوبی و با انطباق بالایی نسبت به واقعیت ارائه می‌دهند.

جدول ۵- مقایسه معیارهای عملکرد و شاخص پایداری سیستم با استفاده از روش قبلی و تحقیق حاضر (%)

منابع و مصارف	روش	قابلیت اطمینان	برگشت‌پذیری	آسیب‌پذیری	شاخص پایداری	منابع آب	
						زیرزمینی (آبخوان‌ها)	سطحی
منابع آب	کلاسیک	۰/۰	۰/۰	۵۹/۲	۰/۰	سد زاینده‌رود	سطحی
	فازی	۱۱/۸	۳/۲	۹۸/۹	۳/۵		
	کلاسیک	۷۱/۷	۵/۹	۰/۴	۳۴/۸	کوهپایه-سگزی	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۱۰۰/۰	۴۰/۱	۰/۰	۷۳/۷		
	کلاسیک	۰/۰	۰/۰	۳/۴	۰/۰	اصفهان-برخورار	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۱۰۰/۰	۳۰/۶	۰/۲	۶۷/۳		
	کلاسیک	۰/۰	۰/۰	۴۸/۶	۰/۰	نجف‌آباد	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۱۶/۹	۰/۶	۹۶/۳	۳/۳		
	کلاسیک	۰/۰	۰/۰	۲۴/۲	۰/۰	لنجانان	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۶۷/۲	۴/۴	۵۹/۸	۲۲/۸		
مصارف آب	کلاسیک	۷۳/۳	۳۷/۵	۰/۰	۶۵/۰	شرب	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۰/۰	۱۰۰/۰		
	کلاسیک	۷۳/۳	۳۷/۵	۱/۱	۶۴/۸	صنعت	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۷۵/۳	۳۹/۹	۹۸/۶	۱۶/۱		
	کلاسیک	۶۶/۷	۴۰/۰	۰/۴	۶۴/۳	کشاورزی	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۸۷/۹	۵۱/۵	۹۸/۷	۱۸/۰		
	کلاسیک	۹۰/۰	۶۶/۷	۱/۴	۸۴/۰	تالاب گاوخونی	زیرزمینی (آبخوان‌ها)
	فازی	۹۲/۴	۷۸/۶	۹۸/۸	۲۰/۶		

تابع عضویت زنگوله‌ای و با جمع‌آوری و تجمیع نظرات کارشناسان و ذینفعان هر بخش در محاسبات لحاظ گردند.

## ۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی آخرین روابط ارائه‌شده از معیارهای عملکرد سیستم‌های منابع آب اعم از قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و شکست‌پذیری پرداخته و به یک نقطه ضعف تأثیرگذار در این روابط اشاره دارد. پایه‌گذاری این روابط در چارچوب کلاسیک یا دودویی باعث ایجاد این نقطه ضعف شده‌است که روابط نمی‌توانند حدی از مطلوبیت را برای وضعیت منابع و یا تأمین نیاز تعیین نمایند؛ بنابراین در مقادیر حدی از وضعیت منابع یا تأمین نیاز، نتایج آن‌ها با واقعیت تا حد بسیار زیادی متفاوت خواهد بود. نتایج این روابط و تأثیر آن‌ها در تخمین پایداری سیستم‌های منابع آب می‌تواند باعث اتخاذ تصمیمات نادرست و نتایج نامطلوب شود. در این تحقیق روابط توسعه‌داده‌شده در دیدگاه کلاسیک در دیدگاه فازی توسعه یافته‌اند که برخلاف دیدگاه کلاسیک به راحتی می‌تواند هر درجه‌ای از مطلوبیت چه در مقادیر حدی و چه در مقادیر بینابینی را در نظر گرفته و عملکرد و پایداری سیستم را بر پایه آن ارزیابی کند. روابط فازی در مقایسه با روابط کلاسیک در قالب یک مثال ساده تئوریک و مطالعه موردی از حوضه آبریز زاینده‌رود مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند؛ نتایج از عملکرد مطمئن‌تر، واقعی‌تر و محسوس‌تر روابط توسعه‌داده‌شده فازی به واقعیت موجود و مشاهده‌شده از نتایج سیستم حکایت دارند.

## پی‌نوشت‌ها

- 1-Environmental Index
- 2-Environmental Stress Index
- 3-Environmental Sustainability Index
- 4-Multi-attributed Environmental Index
- 5-Drought Risk Index
- 6-Palmer Drought Severity Index
- 7-Fairness
- 8-Reversibility
- 9-Consensus
- 10-Resilience
- 11-Reliability
- 12-Vulnerability
- 13-Sustainability Index
- 14-Performance Criteria
- 15-Time-based and Volumetric Reliability
- 16-Probability Based Performance Criteria
- 17-Membership Function
- 18-Baseline Scenario
- 19-Water Evaluation and Planning System (WEAP)
- 20-Incremental Flows (IF)

طبق آنچه در سناریوی روند تعریف شده‌است این واقعیت در سیاست‌های مدیریتی حوضه نیز مشاهده می‌شود که تأمین آب شرب در اولویت اول تمام سیاست‌های تخصیص قرار دارد و نیاز شرب در تمامی شرایط تا حد بسیار زیادی تأمین می‌شود. بر خلاف آنچه در مورد بخش شرب اشاره شد، در بقیه نیازها اعم از صنعت، کشاورزی و تالاب گاوخونی پایداری حاصل از روش قبلی بیشتر از روش فازی جدید می‌باشد و این بدان دلیل است که شکست‌پذیری در تأمین این نیازها در روش جدید بسیار بیشتر از روش کلاسیک (رابطه ۴) ارزیابی شده‌است.

این میزان شکست‌پذیری به وضوح در شکل‌های (۵-ب) تا (۵-د) مشاهده می‌شود. اما به علت آن‌که در رابطه (۴) به نوعی از شکست‌های مختلف در طول دوره آماری میانگین‌گیری می‌شود مقادیر شکست‌پذیری سیستم در روش کلاسیک کم ارزیابی شده‌است؛ در حالی که این شکست‌ها در روش فازی بسیار نامطلوب ارزیابی شده‌اند.

نکته قابل توجه آن است که در این تحقیق تابع عضویت در نظر گرفته شده برای تمامی منابع و مصارف همانند شکل ۲ و مقدار مطلوبیت عملکرد به ازای درصد تأمین‌های مختلف یا درصد حجم آبخوان نسبت به مقدار مطلوب به ترتیب برای کل مصارف و منابع یکسان در نظر گرفته شده است. این تابع عضویت برای هر منبع و هر نیاز می‌تواند با توجه به نظر ذینفعان و کارشناسان خبره به طور جداگانه تعریف شده و محاسبات هر نیاز و هر منبع با تابع عضویت مربوطه انجام شود. در حوضه آبریز زاینده‌رود به دلیل وجود تعداد ۱۳ آبخوان و یک مخزن (منابع آب) و وجود ۳۰ صنعت مهم و مناطق کشاورزی متعدد و تأمین آب شرب از منابع اصلی رودخانه و چاه‌های مختلف فلمن در مبارکه و اصفهان (مصارف آب)، تعیین توابع عضویت مطلوب برای هر یک از منابع و مصارف و تجمیع آن‌ها، خود تحقیقاتی جداگانه و کامل‌تری را در راستای ارزیابی معیارهای عملکرد و شاخص پایداری واقعی‌تر از سیستم‌های منابع و مصارف آب حوضه می‌طلبد. تحقیق بر روی این موضوع از این لحاظ مهم است که در یک محدوده مطالعاتی ممکن است بنابه شرایط خاص یک آبخوان، پائین‌تر بودن دومتري سطح پیزومتري از مقدار مطلوب موردنظر کارشناسان و یا ذینفعان، بسیار نامطلوب ارزیابی شود در حالی که در آبخوانی دیگر پائین‌تر بودن حتی ده متری عمق پیزومتري از عمق مطلوب، مورد رضایت کارشناسان و ذینفعان باشد؛ و یا کمبود تأمین آب برای یک منطقه کشاورزی تا حد ۳۰٪ نیاز آن مطلوب ارزیابی شود اما کمبود ۱۰درصدی در تأمین آب شرب بسیار نامطلوب باشد. این نظرات می‌تواند به واسطه تغییر در پارامترهای



- water resources system performance evaluation. *Water Resources Research* 10(1):14–20.
- Howmiller RP, Scott MA (1977) An environmental index based on relative abundance of oligochaete species. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 809-815.
- Inter3 (2013) IWRM in the Zayandehrud river basin: WMT report-unpublished data, Isfahan Water Board Company (In Persian).
- IPCC (2007b) Intergovernmental panel on climate change, summary for policymakers in climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Klemeš V, Srikanthan R, McMahon TA (1981) Long-memory flow models in reservoir analysis: What is their practical value?. *Water Resources Research* 17(3):737-751.
- Lane BA, Sandoval-Solis S, Porse EC (2014) Environmental flows in a human-dominated system: Integrated water management strategies for the Rio Grande/Bravo basin. *River Research and Applications*, DOI: 10.1002/tra.2804.
- Lence BJ, Fürst J, Matheson SM (1997) Distributive fairness as a criterion for sustainability: evaluative measures and application to project selection. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 4(4):245-258.
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Science Journal* 42(4):513-530.
- Loucks DP, van Beek E (2005) Water resources systems planning and management, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France.
- Madani K, Mariño MA (2009) System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Journal of Water Resources Management* 23(11):2163-2187.
- Mamanpoush A, Miranzadeh M, Akbari M, Torabi M, Toomanian N, Murray-Rust H, Droogers P, Sally H, Gieske A (2000) Water management for sustainable irrigated agriculture in the Zayandeh Rud Basin, Esfahan Province, Iran. *International Water Management Institute*, No. H028239.
- McMahon TA, Adebayo J, Sen-Lin Z (2006) Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324:359–382.
- Mendoza VM, Villanuave EE, Adem J (1997) Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to 21-Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS)
- Ashofteh, PS, Haddad OB, Akbari-Alashti H, Mariño MA (2014) Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000807, 04014059.
- Boysen F (2002) An overview and evaluation of composite indices of development, *Journal of Social Indicators Research* 59:115-151.
- Brown RM, McClellandNI, Deininger RA, O'ConnorMF (1972) A water quality index-crashing the psychological barrier, In *Indicators of Environmental Quality*, Plenum, NY.
- DHI-WASY (2014) Integrated water resources management in Isfahan, Iran: Groundwater model for the Zayandehrud catchment, Isfahan Regional Water Company.
- Danner CL, McKinney DC, Teasley R, Sandoval-Solis S (2006) Documentation and testing of the WEAP model for the Rio Grande/Bravo basin. *Texas University at Austin, TX*.
- Dukhovny V, Sokolov V (2005) Integrated water resources management, experience, and lessons learned from Central Asia-towards the fourth world water forum. *Inter-State Commission for Water Coordination in the Aral Sea Basin, Tashkent*.
- El-Baroudy I, Simonovic SP (2004) Fuzzy criteria for the evaluation of water resource systems performance. *Water Resources Research*, 40(10), W10503, doi:10.1029/2003WR002828.
- Esty DC, Levy M, Srebotnjak T, De Sherbinin A (2005) *Environmental sustainability index: benchmarking national environmental stewardship*. New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy.
- Fanai N, Burn DH (1997) Reversibility as a sustainability criterion for project selection. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 4(4):259-273.
- Gohari A, Eslamian S, Mirchi A, Abedi-Koupaei J, Bavani AM, Madani K (2013) Water transfer as a solution to water shortage: a fix that can backfire. *Journal of Hydrology* 491:23-39.
- Hajkowicz S (2006) Multi-attributed environmental index construction. *Journal of Ecological economics*, 57(1):122-139.
- Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP (1982) Reliability, resiliency and vulnerability criteria for

## ۶- مراجع

- Basin. International Water Management Institute, No. H028241.
- Sandoval-Solis S (2011) Water planning and management for large scale river basins. Case of study: Rio Grande/Rio Bravo transboundary basin, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, Austin, TX.
- Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(5):381-390.
- Sarang A, Vahedi A, Shamsai A (2008) How to quantify sustainable development: a risk-based approach to water quality management. *Environmental management*, 41(2):200-220.
- Sarhadi A, Soltani S (2013) Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A hydrological approach. *Journal of Arid Environments*, 98:27-40.
- Steel RGD, Torrie JH (1960) Principles and procedures of statistics: with special reference to the biological sciences. McGraw-Hill, NY..
- Sumathi S, Paneerselvam S (2010) Computational intelligence paradigms: theory and applications using MATLAB. CRC Press.
- Takeuchi K (1998) Sustainable reservoir development and management (No. 251). International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK.
- Tavakoli, E (2011) Determination of monitoring criteria water resources for sustainability in Zayandeh-Rud river basin, MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (In Persian).
- TCEQ-Texas Commission on Environmental Quality (2007) Water availability models: Rio Grande Basin, Austin, TX.
- Vigerstøl KL(2003) Drought management in Mexico's Rio Bravo basin. Doctoral dissertation, University of Washington, Seattle, WA.
- WHO-World Health Organization (2009) Summary and policy implications Vision 2030: the resilience of water supply and sanitation in the face of climate change. WHO Press.
- Willmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, O'Donnell J, Rowe CM (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. *Geophysics Research Journal*, 90:8995-9005.
- WWRI-Isfahan University of Technology (IUT) (2014) IWRM in the Zayandehrud river basin: climate change report, Isfahan Water Board Company (In Persian).
- global climate change. *Climate Research Journal*, 9:139-145.
- Milbrink G (1983) An improved environmental index based on the relative abundance of oligochaete species. *Journal of Hydrobiology* 102(2):89-97.
- Molle F, Wester P (2009) River basin trajectories: societies, environments and development. International Water Management Institute (IWMI), Vol. 8, Chapter 09.
- Moriassi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions on American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3):885-900.
- Moy WS, Cohon JL, Revelle CS (1986) A programming model for analysis of reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir. *Journal of Water Resources Research* 22(4):2135-2141.
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10:282-290.
- Navid D (1989) International law of migratory species: the Ramsar convention. *The Natural Resources Journal*, 29:1001, 1989.
- Palmer WC (1965) Meteorological drought. Weather Bureau, US Department of Commerce, Washington, DC, USA.
- Ramsar Iran (1971) Convention on wetlands of international importance, especially as waterfowl habitat. UN Treaty Series.
- Reiquam H (1972) Establishing priorities among environmental stresses. In *Indicators of Environmental Quality*: 71-82, Plenum, NY.
- Safavi HR, Chakraei I, Kabiri-Samani A, Golmohammadi MH (2013) Optimal reservoir operation based on conjunctive use of surface water and groundwater using neuro-fuzzy systems, *Water Resources Management*, 27(12):4259-4275.
- Safavi HR, Esfahani MK, Zamani AR (2014) Integrated index for assessment of vulnerability to drought, case study: Zayandehrud River Basin, Iran, *Journal of Water Resources Management*, 28(6):1671-1688.
- Safavi HR, Golmohammadi MH, Sandoval-Solis S (2015) Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology*, 528:773-789.
- Sally H, Salemi HR, Mamanpoush A (2000) An overview of the hydrology of the Zayandeh Rud

- Zongxue X, Jinno K, Kawamura A, Takesaki S, Ito K (1998) Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Journal of Water Resources Management*, 12(1):13-30.
- Zadeh LA (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3):338-353.
- Zayandab Consulting (2008) Determination of resources and consumptions of water in the Zayandehrud river basin, Isfahan Water Board Company (in Persian).