



Developing the Grey Approach in Water Resources Management Using Risk Indexes

P. Golfam¹ and P.S. Ashofteh^{2*}

Abstract

The aim of this study was to apply COPRAS and Grey COPRAS multi-criteria decision making methods to selection of the best agricultural sector water supply alternative for adaptation to the effects of climate change in Gharranghu basin in East Azerbaijan province. According to the existing hydro-climate conditions, adaptation scenarios in agricultural sectors were selected and based on the results of water resources evaluation and planning model (WEAP), risk indexes in each scenario were calculated based on mathematical equations. In order to prioritize and select the best alternative, adaptation scenarios were considered as alternatives, and risk indexes are regarded as criteria in COPRAS and COPRAS-G multi-criteria decision making methods. Results showed risk indexes will be improved by implementing adaptation policies, so that drought risk index would decrease through reduction of water consumption from 5% to 25%. Also, the best alternative for adapting the impacts of climate change phenomenon by using COPRAS method was the fifth alternative, namely 25% reduction in water demand in agricultural sector, while COPRAS-G method introduced second alternative namely 10% reduction in water demand as preferred alternative. It should always be assumed that any prediction of results for the coming years is associated with uncertainty due to complex climatic conditions and its resulting effects.

Keywords: Multi-Criteria Decision-Making, COPRAS Method, COPRAS-G, Risk Indexes, Water Resources Management.

Received: December 18, 2018

Accepted: June 13, 2019

توسعه رویکرد خاکستری در مدیریت منابع آب با استفاده از شاخص‌های ریسک

پروین گلفام^۱ و پریناسادات آشفته^{۲*}

چکیده

هدف از انجام پژوهش حاضر، توسعه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس و کوپراس خاکستری در انتخاب بهترین گزینه سازگاری با اثرات پدیده تغییر اقلیم در تأمین آب بخش کشاورزی در حوضه آبریز قرنقو در استان آذربایجان شرقی است. بدین منظور با توجه به شرایط هیدرواقلیمی موجود، سناریوهای سازگاری در بخش کشاورزی انتخاب و با استفاده از نتایج حاصل از مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WEAP)، شاخص‌های ریسک در هر سناریو بر پایه روابط ریاضی محاسبه می‌شوند. به منظور اولویت‌بندی و انتخاب بهترین گزینه، سناریوهای سازگاری به‌عنوان گزینه‌ها و شاخص‌های ریسک به‌عنوان معیار در دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس و کوپراس خاکستری در نظر گرفته می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات شاخص‌های ریسک در صورت اعمال سیاست‌های سازگاری بهبود یافته، به طوری که شاخص ریسک خشک‌سالی با کاهش مصرف آب به میزان پنج تا ۲۵ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین بهترین گزینه سازگاری با اثرات پدیده تغییر اقلیم با استفاده از روش کوپراس گزینه پنجم یعنی کاهش ۲۵ درصد حجم تقاضای آب در بخش کشاورزی است در حالی که روش کوپراس خاکستری گزینه دوم یعنی کاهش ۱۰ درصدی حجم تقاضا را به‌عنوان گزینه برتر معرفی کرد. گرچه همواره باید در نظر داشت که هرگونه پیش‌بینی نتایج برای سال‌های آینده به دلیل شرایط پیچیده اقلیمی و اثرات متغیر ناشی از آن با عدم قطعیت همراه است.

کلمات کلیدی: روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش کوپراس، کوپراس خاکستری، شاخص‌های ریسک، مدیریت منابع آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۲۳

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. Email: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

منابع آب به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی برای توسعه اجتماعی و اقتصادی هر کشور به شمار می‌آید، در حالی که محدودیت منابع آب در کنار عوامل بحران‌زای طبیعی نظیر پدیده تغییر اقلیم، توسعه پایدار را سخت تحت تأثیر قرار داده تا آنجا که پدیده ورشکستگی آبی^۱ در برخی کشورها رخ داده است. این عوامل در کنار رشد فزاینده جمعیت، افزایش مصرف آب در بخش‌های کشاورزی و صنعت و در نهایت کاهش منابع آب تجدیدناپذیر و افزایش رقابت برای دسترسی به آن، مدیریت بهینه منابع آب موجود را از الزامات زیرساخت‌های توسعه قرار می‌دهد.

در چنین مواردی که نیاز به مدیریت یک مسأله با بهره‌وری بالا و در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف اتخاذ سیاست‌گذاری‌ها باشد، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ بسیار راه‌گشا خواهد بود. این روش‌ها دارای ویژگی‌هایی هستند (Belton and Stewart, 2002): (۱) روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌توانند معیارهای چندگانه و متناقض را به‌صورت صریح و شفاف در نظر بگیرند، (۲) با استفاده از این روش‌ها می‌توان ساختاری مناسب برای مدیریت مسأله ایجاد کرد، (۳) هم‌چنین می‌توانند مدلی ایجاد کنند که بر روی مسأله مورد تصمیم تمرکز کافی وجود داشته باشد، (۴) با روند ارائه‌شده در آنها، تصمیماتی منطقی^۳ و قابل توجیه^۴ اتخاذ می‌شود. تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره به‌طور گسترده در مسائل مختلف مدیریتی در تمامی علوم مورد استفاده قرار می‌گیرند (Ho et al., 2010). در ادامه چند نمونه از کاربردهای روش‌های تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف ذکر شده است. (Srdjevic et al. (2004) شاخص‌های کارایی سامانه مخزن سد در برزیل را به‌صورت مکانی و زمانی تعیین و روش فاصله از گزینه ایده‌آل^۵ (TOPSIS) را برای رتبه‌بندی و ارزیابی سناریوهای مدیریتی منابع آب به‌کار گرفتند. نتایج نشان دادند روش پیشنهادی در ارزیابی راه‌کارها بسیار توانمند است. (Razavi Toosi et al. (2007) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه‌ای فازی، پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای را اولویت‌بندی کردند. (Zarghami et al. (2008) در حوضه آبریز سفیدرود، به‌منظور تعیین اولویت ۱۳ پروژه منابع آب از عمل‌گر فازی میانگین وزنی مرتب‌شده^۶ (FOWA) استفاده کردند. ایشان بیان کردند می‌توان این روش را برای تصمیم‌گیری در گزینه‌های رقابتی تحت عدم قطعیت استفاده کرد. (Gallego-Ayala and Juizo (2011) از تلفیق دو روش سلسله‌مراتبی^۷ (AHP) و SWOT^۸ به منظور رتبه‌بندی عوامل مؤثر در موفقیت راه‌کارهای مدیریت یکپارچه منابع آب در موزامبیک استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان دادند که در این حوضه آبریز یک برنامه‌ریزی منسجم برای اجرایی شدن مفهوم مدیریت یکپارچه منابع و مصارف آب تحت گروه‌های قوی و

ضعیف SWOT ضروری است. (Razavi Toosi et al. (2011) روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه‌ای گروهی فازی را در رتبه‌بندی پروژه‌های انتقال آب بررسی کردند. (Zarghami and Ehsani (2011) از چهار روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور ارزیابی سامانه انتقال آب از رودخانه ارس به مناطق شرق و شمال شرق دریاچه ارومیه استفاده کردند. (Talebi et al. (2013) با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (FAHP) اولویت‌بندی تخصیص منابع آب سد قشلاق سندج را انجام دادند. ایشان سه معیار، نه زیرمعیار و هفت گزینه را تعریف کردند. نتایج نشان دادند معیار اقتصادی مهم‌ترین معیار و تخصیص آب به بخش کشاورزی در اولویت است. (Razavi Toosi et al. (2015) از یک الگوریتم براساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل شبکه‌ای فازی و TOPSIS فازی برای اولویت‌بندی حوضه‌های آبریز استفاده کردند. (Banihabib et al. (2017) روش تصمیم‌گیری هیبریدی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و شباهت به گزینه ایده‌آل اصلاح‌شده (MTAHP) به‌منظور اولویت‌بندی گزینه‌های مدیریت تقاضای آب بخش کشاورزی در مناطق خشک را به‌کار گرفتند. (Toosi and Samani (2017) به‌منظور ارزیابی راه‌کارهای مدیریت منابع آب در پنج حوضه آبریز در ایران از ترکیب دو روش هیبریدی فازی تحلیل شبکه و فازی تاپسیس برای ایجاد مدلی انعطاف‌پذیرتر و دقیق‌تر و نیز کاهش عدم قطعیت‌ها استفاده کردند.

در مباحث مدیریتی منابع آب استفاده از شاخص‌های ریسک^۹ برای سنجش سیاست‌های بهره‌برداری از سامانه مورد نظر، کارایی زیادی دارند که در ادامه اشاره می‌شود. (Yang et al. (2012) در جنوب تایوان از شاخص‌های ریسک برای محاسبه شدت خشک‌سالی در آینده نسبت به بازه زمانی پایه استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش تناوب و شدت خشک‌سالی‌ها در سال‌های آینده است. (Ashofteh et al. (2013) شاخص‌های کارایی مخزن شامل اطمینان‌پذیری^{۱۰}، برگشت‌پذیری^{۱۱} و آسیب‌پذیری^{۱۲} را برای سد آیدوغموش محاسبه کرده و نشان دادند که تمامی شاخص‌ها در بازه زمانی تغییر اقلیم نسبت به بازه زمانی پایه وضعیت بحرانی‌تری خواهند داشت.

از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌طور گسترده در سایر رشته‌ها نیز استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال می‌توان به انتخاب بهترین کشور از میان کشورهای کاندیدای میزبان برای یک شرکت (Chen and Tzeng. (2004) حل مسأله انتخاب تأمین‌کنندگان در یک محیط غیرقطعی (Li et al. (2007)، انتخاب منابع انسانی مناسب از میان افراد داوطلب (HashemKhani Zolfani. (2012)، ارزیابی کیفیت رسوب (Jiang et al. (2015)، انتخاب کمپرسور هوا^{۱۳} به‌منظور تأمین گردش مناسب هوا در شرکت‌های نساجی (Kundakcı and Tuş Işık.

در ادامه تعریف هر شاخص و رابطه ریاضی مربوط به آن آورده شده است.

شاخص اطمینان‌پذیری زمانی بیان می‌کند که چند درصد مواقع، تقاضای موجود در پایاب سد توسط آب موجود در مخزن سد در طی دوره زمانی بهره‌برداری تأمین شده است (Hashimoto et al., 1982). به بیان دیگر درصدی از بازه زمانی بهره‌برداری که تقاضای آب پایاب به‌طور کامل تأمین شود و مقدار کمبود برابر با صفر است.

$$\alpha = \frac{N}{T} \quad (1)$$

$$N = \sum_{t=1}^T \text{count}_t (R_t \geq D_t)$$

که در آن، α = اطمینان‌پذیری زمانی (درصد)، N = تعداد ماه‌هایی که در آنها رهاسازی از مخزن مساوی یا بیش‌تر از تقاضا در پایاب سد می‌باشد (حالت مطلوب)؛ T = طول بازه بهره‌برداری؛ D_t = حجم تقاضا در پایاب سد در زمان t ام؛ R_t = حجم رهاسازی از مخزن سد در زمان t ام؛ count = تابع شمارش (به‌گونه‌ای که رهاسازی‌های بیش‌تر از تقاضا را در کل بازه بهره‌برداری در نظر می‌گیرد) هستند.

شاخص آسیب‌پذیری بیان‌کننده شدت خسارت ناشی از عدم تأمین تقاضا در سامانه تأمین آب است. آسیب‌پذیری به‌صورت میانگین شکست‌ها (Loucks and Van Beek, 2005)، میانگین بیشینه کمبود در تمام دوره‌های متوالی شکست (Hashimoto et al., 1982)، احتمال افزایش یک آستانه کمبود مشخص (Mendoza et al., 1997) تعریف شده است. در این پژوهش آسیب‌پذیری مطابق تعریف Hashimoto et al. (1982) محاسبه می‌شود:

$$v = \frac{\text{def}_t}{T \cdot D_{\max}} \quad (2)$$

که در آن، v = شاخص آسیب‌پذیری (درصد)؛ و D_{\max} = بیشینه مقدار تقاضا در کل بازه بهره‌برداری، هستند.

شاخص برگشت‌پذیری ظرفیت سامانه تأمین آب برای سازگاری با شرایط در حال تغییر است. به‌عبارت دیگر سرعت ترمیم شکست در سامانه است.

$$\beta = \frac{N'' [\text{def}_t (R_{t+1} > D_{t+1})]}{N'} \quad (3)$$

$$N'' = \sum_{t=1}^T \text{count}'_t (R_t < D_t)$$

$$\text{def} = \sum_{t=1}^T |R_t - D_t|$$

که در آن، β = شاخص برگشت‌پذیری (درصد)؛ N'' = تعداد ماه‌هایی که در آنها حجم رهاسازی کم‌تر از حجم تقاضا است (حالت نامطلوب)؛

(2016)، انتخاب بهترین شهر ترکیه برای میزبانی بازی‌های المپیک Carasa et al. (2018) از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد. همان‌طور که اشاره شد تاکنون پژوهش‌های متعددی پیرامون توسعه نظریه سامانه خاکستری از نظر ریاضی انجام شده و در هیچ‌یک از پژوهش‌ها و مقالات در زمینه مدیریت منابع آب در شرایط ناشی از اثرات پدیده تغییر اقلیم از دو روش تصمیم‌گیری کوپراس^{۱۴} و کوپراس خاکستری^{۱۵} با اعمال شاخص‌های ریسک استفاده نشده است، که این مورد به‌عنوان نوآوری تحقیق حاضر مطرح است. در این پژوهش از دو روش تصمیم‌گیری کوپراس و کوپراس خاکستری استفاده شده است که علاوه‌بر توسعه این دو روش برای مدیریت منابع آب به‌منظور سازگاری با شرایط تغییر اقلیم، امکان مقایسه حاصل از دو روش و بازتاب مفاهیم خاکستری بر نتایج نیز وجود داشته باشد. در روش کوپراس بهترین گزینه با در نظر گرفتن میانگین از راه‌حل‌های ایده‌آل و ضد ایده‌آل انتخاب می‌شود که در مسائل واقعی نسبت به راه‌حل فقط ایده‌آل کاربردی‌تر است. تلفیق مفاهیم خاکستری با روش کوپراس گامی در جهت کاهش عدم قطعیت برای تصمیم‌گیری است؛ چرا که در این روش از اختصاص توابع عضویت بالا و پایین استفاده می‌شود که می‌تواند عوامل پیش‌بینی‌نشده بر نتایج تصمیم‌گیری را نیز در نظر بگیرد.

۲- روش تحقیق

در پژوهش حاضر، ابتدا راه‌کارهای سازگاری با پدیده تغییر اقلیم در بخش کشاورزی شامل کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی به میزان پنج تا ۲۵ درصد در قالب تغییر الگوی کشت، به‌عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری تعیین شدند. شاخص‌های ریسک شامل شاخص‌های آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری زمانی و پایداری لاکس^{۱۶}، شاخص ریسک خشک‌سالی^{۱۷}، شاخص پایداری ری^{۱۸} و پایداری اصلاح‌شده یانگ^{۱۹} به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته و توسط روش AHP براساس جمع‌بندی نظر کارشناسان وزن‌دهی شدند. به‌منظور رتبه‌بندی و انتخاب بهترین گزینه از دو روش تصمیم‌گیری کوپراس و کوپراس خاکستری استفاده شد.

۲-۱- معیارهای تصمیم‌گیری

یکی از اجزاء اصلی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، تعیین معیارهای کارآمد و مؤثر است، به‌گونه‌ای که توانایی ارزیابی جنبه‌های مختلف یک تصمیم را داشته باشند. در این پژوهش، شاخص‌های ریسک به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری انتخاب شدند. شاخص‌های ریسک به‌منظور ارزیابی سیاست‌های مدیریتی منابع استفاده می‌شوند و توانایی مقایسه نتایج حاصل از اتخاذ سیاست‌های مختلف را دارند.

۲-۱-۲- روش کوپراس

Zavadskas and Kaklauskas. (1996) روش کوپراس را ابداع کردند. در این روش تأثیر بیشینه‌سازی و کمینه‌سازی معیارها بر روی ارزیابی نتایج به صورت مجزا در نظر گرفته می‌شود و شامل گام‌های زیر است:

(الف) ایجاد ماتریس تصمیم مسأله: اولین گام تشکیل ماتریس تصمیم مسأله است.

$$D = [x_{ij}] = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن، x_{ij} ارزیابی گزینه i ام در رابطه با معیار j ام، $m =$ تعداد گزینه‌ها و $n =$ تعداد معیارها هستند.

(ب) نرمال‌سازی ماتریس تصمیم: به منظور بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه زیر ماتریس تصمیم نرمال‌سازی می‌شود:

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (9)$$

(پ) ماتریس تصمیم نرمال‌شده موزون: در این مرحله با استفاده از وزن شاخص‌ها، ماتریس تصمیم نرمال‌شده موزون محاسبه می‌شود. در صورتی که وزن شاخص‌ها به صورت $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ باشد، ماتریس تصمیم نرمال‌شده موزون به صورت رابطه (۱۰) خواهد بود:

$$D = [y_{ij}] = r_{ij} \times w_j, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

که در آن، r_{ij} مقدار نرمال‌شده گزینه i ام در معیار j ام $w_j =$ وزن معیار j ام هستند. همواره مقدار مجموع وزن نرمال‌شده موزون گزینه‌ها در یک معیار برابر با وزن آن است.

(ت) محاسبه مجموع مقادیر نرمال‌شده موزون برای معیارهای سودمند (سود یا مثبت) و معیارهای غیرسودمند (هزینه یا منفی): در این مرحله با استفاده از رابطه زیر مجموعه مقادیر نرمال‌شده موزون برای معیارهای سودمند و غیرسودمند محاسبه می‌شود:

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y_{+ij}, S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \quad (11)$$

که در آن، $y_{+ij} =$ مقدار نرمال‌شده موزون برای معیارهای سودمند و $y_{-ij} =$ مقدار نرمال‌شده موزون برای معیارهای غیرسودمند است.

(ث) تعیین اهمیت نسبی^{۲۰} گزینه‌ها: اهمیت نسبی هر گزینه با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} \times \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-} \times \sum_{i=1}^m \left(\frac{S_{-min}}{S_{-i}}\right)} = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{S_{-i}}\right)}, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

که در آن، $S_{-min} =$ کمینه مقدار S_{-i} است. هرچه میزان Q_i بیش‌تر باشد، گزینه مربوط به آن رتبه بهتری خواهد داشت.

$def_i =$ کمبود سامانه (قدر مطلق فاصله میان حجم رهاسازی و حجم تقاضا): $R_{t+1} =$ حجم رهاسازی از مخزن سد در زمان $t+1$ ؛ $D_{t+1} =$ حجم تقاضا در پایاب سد در زمان $t+1$ ؛ $count'_t =$ شمارش (به‌گونه‌ای که رهاسازی‌ها کم‌تر از تقاضا باشد)، هستند.

شاخص پایداری لاکس (Locks, 1997) ترکیبی از سه شاخص اشاره شده در قبل است و یکی از کارآمدترین شاخص‌های ریسک می‌باشد:

$$\gamma = \alpha.\beta.(1-\nu) \quad (4)$$

که در آن، $\gamma =$ شاخص پایداری لاکس است.

شاخص ریسک خشک‌سالی (Zongxue et al., 1998) ترکیب وزنی از شاخص‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری است و کمبود آب در سامانه به علت وقوع خشک‌سالی را نشان می‌دهد.

$$DRI = \left(\frac{1}{2}(1-\alpha) + \frac{1}{4}(1-\beta) + \frac{1}{4}\nu \right) \quad (5)$$

که در آن، $DRI =$ شاخص ریسک خشک‌سالی است.

شاخص پایداری ری (که اولین بار ضرورت آن توسط Ray e al. (2010) مطرح و در ادامه فرمول آن توسط Sandoval-Solis et al. (2011) ارائه شد)، پایداری سامانه در برابر تغییرات هیدرولوژیکی و انسانی مؤثر را مورد بررسی قرار می‌دهد و هر اندازه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، سامانه در وضعیت مناسب‌تری قرار دارد:

$$SUI = (\alpha.\beta.(1-\nu))^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

که در آن، $SUI =$ شاخص پایداری سامانه تأمین آب است.

شاخص پایداری اصلاح‌شده یانگ (Yang et al. (2012) احتمال بروز کم‌آبی را در نظر می‌گیرد و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد مقدار آن بحرانی‌تر است.

$$MSUI = ((1-\alpha).(1-\beta).\nu)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

که در آن، $MSUI =$ شاخص پایداری اصلاح‌شده سامانه تأمین آب است.

۲-۲- روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در تمامی حوزه‌های مدیریتی به‌طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که در این روش‌ها انتخاب معیارها و وزن‌دهی آنها، انتخاب اهداف و نوع روش تصمیم‌گیری با تجمیع نظر کارشناسان مسأله مورد تصمیم و با سنجش تمام جوانب یک تصمیم انجام می‌شود می‌تواند خطاهای ناشی از اتخاذ یک سیاست را به کم‌ترین مقدار ممکن برساند.

(ج) محاسبه کمی سودمندی هزینه‌ها: در این مرحله با استفاده از رابطه زیر میزان سودمندی گزینه‌ها محاسبه می‌شود:

$$u_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \times 100\% \quad (13)$$

که در آن، Q_{\max} = بزرگ‌ترین مقدار اهمیت نسبی گزینه‌ها و u_i = شاخص سودمندی^{۲۱} هستند. مقدار سودمندی بین صفر تا ۱۰۰ درصد متغیر است و هرچه مقدار سودمندی یک گزینه بیش‌تر باشد، اولویت بالاتری خواهد داشت.

۲-۲-۲ روش کوپراس خاکستری

(Deng (1982) نظریه سامانه‌های خاکستری را برای بار نخست بر مبنای مجموعه‌های خاکستری ارائه داد. در تئوری خاکستری نام گذاری براساس میزان شناخته بودن اطلاعات است. بدین ترتیب سامانه‌های با اطلاعات به‌طور کامل معلوم را سامانه سفید، سامانه‌ها با اطلاعات ناشناخته یا عدم وجود داده را سامانه سیاه و سامانه با اطلاعاتی که بخشی از آن معلوم و بخشی از آن ناشناخته باشد سامانه خاکستری نامیده می‌شود. (Li et al. (2006) اصول بنیادین تئوری خاکستری را به‌صورت زیر بیان می‌کنند: (۱) اصل اختلاف^{۲۲}، (۲) اصل غیریکتایی در جواب^{۲۳}، (۳) اصل کمینه اطلاعات^{۲۴}، (۴) اصل شناخت محور^{۲۵}، (۵) اصل اولویت اطلاعات جدید^{۲۶}، (۶) اصل خاکستری بودن مطلق^{۲۷}. روابط میان اعداد خاکستری به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

عدد خاکستری عددی است که مقدار دقیق آن نامشخص است، اما حدود بالا و یا پایین آن می‌تواند تخمین زده شوند. عدد خاکستری به‌طور کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\otimes G, \otimes G = G \begin{bmatrix} \bar{\mu} \\ \underline{\mu} \end{bmatrix} \quad (14)$$

در صورتی که فرض شود X مجموعه جهانی باشد، مجموعه خاکستری G از مجموعه X از طریق دو نگاشت^{۲۸} زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} \bar{\mu}_G = (x): x \rightarrow [0,1] \\ \underline{\mu}_G = (x): x \rightarrow [0,1] \end{cases} \quad (15)$$

که در آن $\bar{\mu}_G(x)$ و $\underline{\mu}_G(x)$ به ترتیب تابع عضویت بالایی و پایینی G هستند. در حالتی که $\bar{\mu}_G(x) \geq \underline{\mu}_G(x)$ باشد و نیز شرط $\bar{\mu}(x) = \underline{\mu}(x)$ برقرار باشد، مجموعه خاکستری تبدیل به یک مجموعه فازی خواهد شد که نشان‌دهنده آن است که تئوری خاکستری شرایط فازی بودن را نیز در نظر می‌گیرد. اگر فقط حد بالای G قابل تخمین زدن باشد و G به‌عنوان حد پایین در نظر گرفته شود، عدد خاکستری به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\otimes G = (-\infty, \bar{G}] \quad (16)$$

اگر فقط حد پایین G قابل تخمین زدن باشد و G به‌عنوان حد بالا در نظر گرفته شود، عدد خاکستری به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\otimes G = [\underline{G}, \infty) \quad (17)$$

اگر حدود بالا و پایین G تخمین زده شود، عدد میان‌بازه‌ای G به‌صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$\otimes G = [\underline{G}, \bar{G}] \quad (18)$$

طول یک عدد خاکستری به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L(\otimes G) = [\bar{G} - \underline{G}] \quad (19)$$

اگر دو عدد خاکستری به شکل $\otimes G_1 = [\underline{G}_1, \bar{G}_1]$ و $\otimes G_2 = [\underline{G}_2, \bar{G}_2]$ باشند، عملیات اساسی ریاضی به‌صورت روابط زیر است:

$$\otimes G_1 + \otimes G_2 = [\underline{G}_1 + \underline{G}_2, \bar{G}_1 + \bar{G}_2] \quad (20)$$

$$\otimes G_1 - \otimes G_2 = [\underline{G}_1 - \underline{G}_2, \bar{G}_1 - \bar{G}_2] \quad (21)$$

$$(22)$$

$$\begin{aligned} \otimes G_1 \times \otimes G_2 &= [\underline{G}_1, \bar{G}_1] \times [\underline{G}_2, \bar{G}_2] \\ &= [\text{Min}(\underline{G}_1 \underline{G}_2, \underline{G}_1 \bar{G}_2, \bar{G}_1 \underline{G}_2, \bar{G}_1 \bar{G}_2), \text{Max}(\underline{G}_1 \underline{G}_2, \underline{G}_1 \bar{G}_2, \bar{G}_1 \underline{G}_2, \bar{G}_1 \bar{G}_2)] \end{aligned}$$

$$\otimes G_1 \div \otimes G_2 = [\underline{G}_1, \bar{G}_1] \times \left[\frac{1}{\underline{G}_2}, \frac{1}{\bar{G}_2} \right] \quad (23)$$

برای مقایسه اعداد خاکستری از درجه احتمال خاکستری^{۲۹} استفاده می‌شود. برای دو عدد خاکستری $\otimes G_1 = [\underline{G}_1, \bar{G}_1]$ و $\otimes G_2 = [\underline{G}_2, \bar{G}_2]$ درجه احتمال خاکستری $\otimes G_2 \geq \otimes G_1$ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$P\{\otimes G_1 \leq \otimes G_2\} = \frac{\text{Max}(0, L^* - \text{Max}(0, \bar{G}_1 - \underline{G}_2))}{L^*} \quad (24)$$

$$L^* = L(\otimes G_1) + L(\otimes G_2) \quad (25)$$

برای رابطه موقعیت بین دو عدد خاکستری $\otimes G_1$ و $\otimes G_2$ چهار مورد ممکن در محور عدد واقعی وجود دارد:

(۱) اگر $\underline{G}_1 = \underline{G}_2$ و $\bar{G}_1 = \bar{G}_2$ باشد، دو عدد برابر هستند، یعنی $\otimes G_1 = \otimes G_2$ و درجه احتمال خاکستری برابر با ۰/۵ است.

(۲) اگر $\underline{G}_2 > \bar{G}_1$ باشد، عدد خاکستری دو بزرگ‌تر از عدد خاکستری یک است، یعنی $\otimes G_2 > \otimes G_1$ و درجه احتمال خاکستری برابر با یک است.

(۳) اگر $\bar{G}_2 < \underline{G}_1$ باشد، عدد خاکستری دو کوچک‌تر از عدد خاکستری یک است، یعنی $\otimes G_2 < \otimes G_1$ و درجه احتمال خاکستری برابر با صفر است.

(۴) اگر یک بخش مشترک در دو عدد خاکستری وجود داشته باشد، در حالتی که درجه احتمال خاکستری بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد، در این

صورت $G_2 < G_1$ است. در حالی که درجه احتمال خاکستری کم تر از $0/5$ باشد، $G_2 > G_1$ است.

در ادامه گام‌های روش کوپراس خاکستری شرح داده می‌شود:
(الف) انتخاب گزینه‌ها، معیارها و مشخص کردن معیارهای مثبت و منفی: معیارهای مثبت و منفی معیارهایی هستند که به ترتیب بیشینه و کمینه آنها مطلوب است.

(ب) تشکیل ماتریس تصمیم خاکستری: در این مرحله ماتریس تصمیم خاکستری شامل ماتریس معیار-گزینه تشکیل می‌شود.

$$\otimes X = \begin{bmatrix} [\otimes x_{11}] & [\otimes x_{12}] & \cdots & [\otimes x_{1m}] \\ [\otimes x_{21}] & [\otimes x_{22}] & \cdots & [\otimes x_{2m}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [\otimes x_{n1}] & [\otimes x_{n2}] & \cdots & [\otimes x_{nm}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [w_{11}, b_{11}] & [w_{12}, b_{12}] & \cdots & [w_{1m}, b_{1m}] \\ [w_{21}, b_{21}] & [w_{22}, b_{22}] & \cdots & [w_{2m}, b_{2m}] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [w_{n1}, b_{n1}] & [w_{n2}, b_{n2}] & \cdots & [w_{nm}, b_{nm}] \end{bmatrix} \quad (26)$$

$j = \overline{1, n}; i = \overline{1, m}$

که در آن، w_{ij} = حد پایین (کم‌ترین مقدار) و b_{ij} = حد بالا (بیش‌ترین مقدار)، m = تعداد شاخص‌ها و n = تعداد گزینه‌ها، هستند.

(پ) محاسبه وزن معیارها.

(ت) نرمال‌سازی ماتریس تصمیم: نرمال‌سازی در این روش با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\overline{w_{ij}} = \frac{w_{ij}}{\frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^n w_{ji} + \sum_{j=1}^n b_{ji} \right)} = \frac{2w_{ij}}{\sum_{j=1}^n (w_{ji} + b_{ji})} \quad (27)$$

$$\overline{b_{ji}} = \frac{b_{ji}}{\frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^n w_{ji} + \sum_{j=1}^n b_{ji} \right)} = \frac{2b_{ji}}{\sum_{j=1}^n (w_{ji} + b_{ji})} \quad (28)$$

که در آن، w_{ji} = حد پایین معیار i ام در گزینه j ، b_{ji} = حد بالای معیار i در گزینه j ، هستند. ماتریس نرمالیزه به صورت زیر خواهد بود:

(29)

$$\otimes \hat{X} = \begin{bmatrix} \overline{\otimes x_{11}} & \cdots & \overline{\otimes x_{1m}} \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ \overline{\otimes x_{n1}} & \cdots & \overline{\otimes x_{nm}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [w_{11}, b_{11}] & \cdots & [w_{1m}, b_{1m}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [w_{n1}, b_{n1}] & \cdots & [w_{nm}, b_{nm}] \end{bmatrix}$$

(ث) تشکیل ماتریس نرمال شده موزون: در این گام مقادیر ماتریس نرمالیزه موزون از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\otimes \hat{x}_{ji} = \overline{\otimes x_{ji}} \cdot q_i; \quad \hat{w}_{ji} = \overline{w_{ji}} \cdot q_i; \quad \hat{b}_{ji} = \overline{b_{ji}} \cdot q_i \quad (30)$$

در این رابطه q_i = وزن هر معیار، و $\otimes \hat{x}_{ji}$ = مقدار نرمالیزه موزون هر معیار، بنابراین ماتریس تصمیم نرمالیزه موزون به صورت زیر خواهد بود:

(31)

$$\otimes \hat{X} = \begin{bmatrix} \otimes \hat{x}_{11} & \cdots & \otimes \hat{x}_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \otimes \hat{x}_{n1} & \cdots & \otimes \hat{x}_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\hat{w}_{11}, \hat{b}_{11}] & \cdots & [\hat{w}_{1m}, \hat{b}_{1m}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [\hat{w}_{n1}, \hat{b}_{n1}] & \cdots & [\hat{w}_{nm}, \hat{b}_{nm}] \end{bmatrix}$$

(ج) محاسبه P_j و R_j : از ماتریس ایجادشده در گام پیشین مقادیر P و R مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_j = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (\hat{w}_{ji} + \hat{b}_{ji}) \quad (32)$$

$$R_j = \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^m (\hat{w}_{ji} + \hat{b}_{ji}), i = \overline{k, m} \quad (33)$$

که در آن، P_j = مجموع مقادیر نرمال معیارهای مثبت و R_j = مجموع مقادیر نرمال معیارهای منفی، هستند.

(چ) محاسبه وزن نسبی هر گزینه: با استفاده از رابطه زیر وزن نسبی هر گزینه محاسبه می‌شود:

$$Q_j = P_j + \frac{\sum_{j=1}^n R_j}{R_j \sum_{j=1}^n R_j} \quad (34)$$

که در آن، Q_i = وزن نسبی هر گزینه است.

(ح) محاسبه درجه سودمندی گزینه‌ها: با استفاده از رابطه زیر درجه سودمندی هر گزینه به دست می‌آید:

$$N_j = \frac{Q_j}{Q_{\max}} \times 100\% \quad (35)$$

که در آن، Q_{\max} = بیشینه وزن نسبی گزینه است و N_j = شاخص سودمندی هر گزینه است که هر اندازه مقدار بیش‌تری داشته باشد، مطلوب‌تر است.

۳- منطقه مطالعاتی

در این بخش منطقه مطالعاتی طرح و ویژگی‌های آن معرفی خواهد شد.

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز قرنقو^۳ زیرحوضه‌ای از سفیدرود بزرگ در محدوده حوضه آبریز دریای خزر، در استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران قرار گرفته است. این حوضه با وسعتی معادل ۳۵۹۰ کیلومتر مربع در عرض شمالی ۴۷ درجه و ۵۵ دقیقه و عرض شرقی ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه در دامنه شرقی رشته‌کوه سهند گسترده شده است (شکل ۱). در این حوضه هشت رودخانه جاری است که رودخانه قرنقو با طول ۱۲۰ کیلومتر در جهت شرقی- غربی و میانگین آبدهی سالانه ۱۴۹ میلیون مترمکعب، رودخانه اصلی است. سد سهند با ظرفیت کل ۱۶۵، حجم

مرده ۱۷ و حجم مفید ۱۳۵ میلیون مترمکعب و تراز نرمال ۱۶۰۰/۳ متر از سطح دریا، در محل بهم پیوستن دو رودخانه آمالو و قرنقو ساخته شده است. اهداف سد چندمنظوره سهند، تأمین نیاز بخش کشاورزی با سطح زیرکشت ۱۴۵۰۰ هکتار، بخش زیست‌محیطی با پنج میلیون مترمکعب و بخش شرب و صنعت هرکدام با سه میلیون مترمکعب می‌باشد. در بخش تغییر اقلیم تحقیق حاضر از مدل HadCM3 و تحت سناریوی انتشار A2 استفاده شده است. به دلیل دارا بودن اطلاعات ایستگاه‌ها در دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰، این دوره به عنوان دوره پایه در نظر گرفته شده است.

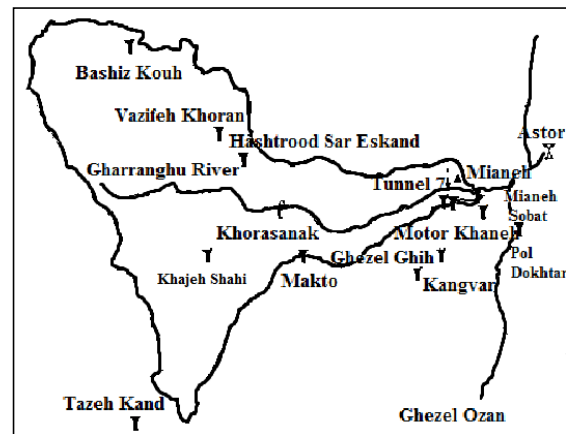


Fig. 1- The study area

شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم در این حوضه، با استفاده از مدل‌های عمومی گردش جو- اقیانوس^{۳۲} (AOGCM)، سناریوهای اقلیمی دما و بارش در آینده تولید شدند. نتایج نشان دادند که دما در سال‌های آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۹) نسبت به بازه زمانی پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) بین ۱/۷ تا ۳/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش بین محدوده ۶۰- تا ۳/۸ درصد تغییر خواهد کرد. برای تخمین تغییرات حجم جریان ورودی به سد سهند در آینده، مدل بارش- رواناب^{۳۳} (IHACRES) استفاده شد. نتایج مدل IHACRES نشان دادند که متوسط بلندمدت ماهانه جریان ورودی به مخزن در بازه زمانی تغییر اقلیم در حدود ۲۵ درصد نسبت به بازه زمانی پایه کاهش خواهد داشت. هم‌چنین نتایج مدل Cropwat نشان دادند که مصرف آب در بخش کشاورزی در بازه زمانی تغییر اقلیم نسبت به بازه زمانی پایه ۲۰ درصد افزایش خواهد داشت (Ashofteh et al., 2017).

بروز این عدم توازن در عرضه و تقاضای آب این حوضه، سیاست‌گذاران و ذی‌نفعان را بر آن داشت تا گزینه‌های مختلف مدیریت تقاضا را بررسی و با استفاده از ابزار تصمیم‌گیری چندمعیاره، بهترین گزینه را انتخاب کنند. با توجه به این نکته که در حوضه آبریز قرنقو بیش‌ترین مصرف آب در بخش کشاورزی است، سناریوهای مدیریتی برای مدیریت بهینه تخصیص منابع آب در این بخش تدوین شدند که شامل پنج سناریو در قالب تغییر الگوی کشت محصولات در پایاب سد و در نتیجه کاهش مصرف آب به میزان پنج تا ۲۵ درصد است.

۴- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از روش‌های تصمیم‌گیری در بخش ۲ به تفصیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۱- نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های ریسک

مقایسه مقادیر شاخص‌های ریسک در بازه زمانی پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و بازه زمانی آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۹) به خوبی نشان می‌دهد که پدیده تغییر اقلیم در حوضه آبریز قرنقو تغییرات چشم‌گیری در رفتار سامانه تأمین آب دارد که به‌منظور کاهش این اثرات نامطلوب، سیاست‌گذاران باید سناریوهایی در جهت کاهش آسیب‌پذیری سامانه در نظر بگیرند.

در گام نخست شاخص‌های ریسک در بازه زمانی پایه محاسبه شدند. سپس میزان تغییرات شاخص‌های ریسک با اعمال هر سناریو مورد بررسی قرار گرفت تا میزان اثربخشی هر سناریو در کاهش مصرف آب کشاورزی ارزیابی شود. در پژوهش حاضر هفت شاخص ریسک مخزن در نظر گرفته شده است تا بتواند رفتار سامانه را به‌طور کامل مورد

۳-۲- انتخاب گزینه‌های تصمیم‌گیری

هدف نهایی هر مسأله مورد تصمیم، انتخاب بهترین گزینه با توجه به ساختار مسأله، معیارها و رویکردهای موجود در آن است. اغلب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره علاوه بر انتخاب بهترین گزینه، رتبه بندی گزینه‌ها را نیز انجام می‌دهند. در پژوهش حاضر ابتدا وضعیت فعلی منابع و مصارف آب در حوضه آبریز قرنقو با استفاده از مدل‌ساز برنامه‌ریزی و ارزیابی آبی^{۳۱} (WEAP) شبیه‌سازی شد. در این تحقیق از شاخص‌های ریسک برای بررسی عمل‌کرد سامانه تأمین آب (مخزن سد) استفاده شده است. جهت محاسبه شاخص‌های ریسک محاسبه میزان تغییرات رهاسازی از مخزن و تقاضای پایاب سد در بازه زمانی پایه و سال‌های آتی ضروری است. مدل WEAP یکی از قدرتمندترین مدل‌های شبیه‌سازی مدیریت یک‌پارچه منابع به‌ویژه برای شبیه‌سازی سناریوها در سال‌های آتی است و می‌تواند پاسخ سامانه در برابر هرگونه اعمال تغییر را به‌وضوح نشان دهد. یکی از ویژگی‌های مهم مدل WEAP تخصیص اولویت تأمین برای تقاضاهای موجود در پایاب سد است که باعث شده است از مدل WEAP به‌عنوان مدل شبیه‌ساز استفاده شود.

ارزیابی قرار دهد. جدول ۱ میزان تغییرات شاخص‌های ریسک را به‌ازای اجرای هر سناریو برحسب درصد نشان می‌دهد.

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، شاخص اطمینان‌پذیری با کاهش مصرف آب کاهش می‌یابد، بدان‌معنا که گام‌هایی از بازه زمانی که در آنها سامانه قادر به تأمین تقاضای پایاب سد است، افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۱ شاخص اطمینان‌پذیری با کاهش مصرف آب به میزان پنج درصد، ۷۹ درصد خواهد بود، در حالی که با کاهش ۲۵ درصدی مصرف آب، این شاخص به میزان ۸۷ درصد می‌رسد بدان‌معنا که رفتار سامانه بهبود یافته و به‌سوی کاهش فاصله میان عرضه و تقاضا خواهد رفت. شاخص آسیب‌پذیری نشان‌دهنده میزان خسارت به سامانه تأمین آب در بازه زمانی بهره‌برداری است. با توجه به جدول ۱ میزان شاخص آسیب‌پذیری در بازه زمانی پایه نسبت به زمانی آتی بیش‌تر است و در بازه زمانی تغییر اقلیم با کاهش میزان تقاضا کاهش می‌یابد بدان‌معنا که در بازه زمانی پایه سامانه در معرض خسارت فراوان قرار دارد، اما با مدیریت تقاضا در قالب سیاست‌های سازگاری، میزان خسارت کاهش می‌یابد. باید در نظر داشت شاید میزان تغییرات این شاخص اندک باشد، اما تأثیر چشم‌گیری بر کاهش مقدار خسارت دارد. شاخص برگشت‌پذیری یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای سنجش عمل‌کرد رفتار سامانه در مباحث مربوط به مدیریت منابع آب است. شاخص برگشت‌پذیری سرعت ترمیم سامانه را نشان می‌دهد. ترمیم سامانه عبور از حالت نامطلوب (شکست یا عدم تأمین تقاضا) به حالت مطلوب بهره‌برداری (پیروزی یا تأمین تقاضا) را نشان می‌دهد. هر اندازه مقدار این شاخص بیش‌تر باشد، عملکرد سامانه مطلوب‌تر است. مطابق جدول ۱ با کاهش تقاضا روند تغییرات شاخص برگشت‌پذیری بهبود می‌یابد. شاخص پایداری لاکس، که ترکیبی از سه شاخص اطمینان‌پذیری زمانی، شاخص آسیب‌پذیری و شاخص برگشت‌پذیری است، یکی از مهم‌ترین و کارآترین شاخص‌ها در مدیریت منابع آب به‌منظور بررسی رفتار سامانه است. در حالتی که هیچ‌گونه سیاست سازگاری اعمال نشود شاخص پایداری لاکس کم‌ترین مقدار را دارد

در صورتی که با اعمال سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم روند تغییرات شاخص پایداری لاکس به‌صورت افزایشی تغییر می‌کند. شاخص پایداری لاکس مهم‌ترین شاخص برای بررسی عمل‌کرد سامانه‌ها است. شاخص ریسک خشک‌سالی، کمبود آب در سامانه متأثر از خشک‌سالی را نشان می‌دهد. کمبود آب که تأمین تقاضا را با خطر مواجه می‌کند و نشان‌دهنده تأثیرات خشک‌سالی بر رفتار سامانه است. کاهش تقاضای آب اثرات ناشی از خشک‌سالی در سامانه تأمین آب را به‌میزان قابل‌توجهی تعدیل کند و اثرات مخرب آن را کاهش دهد. شاخص پایداری، پایداری سامانه تأمین آب در برابر تغییرات هیدرولوژیکی و انسانی را نشان می‌دهد. تغییرات هیدرولوژیکی نظیر بارش و تغییرات انسانی نظیر فعالیت‌هایی که میزان تقاضا را تغییر می‌دهد در تغییرات این شاخص در نظر گرفته شده است. هرچه اندازه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، میزان پایداری رفتار سامانه بیش‌تر است و تغییرات پیش‌بینی نشده که در بازه زمانی بهره‌برداری ممکن است برای سامانه به وجود بیاید، اثرات کم‌تری بر سامانه دارد. شاخص پایداری اصلاح‌شده یانگ، احتمال ایجاد کم‌آبی در سامانه را نشان می‌دهد. کم‌آبی در سامانه باعث ایجاد آسیب و خسارت می‌شود که به معنای افزایش آسیب‌پذیری از یک طرف و کاهش اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری از طرف دیگر می‌شود. بدین‌ترتیب افزایش شاخص پایداری اصلاح‌شده یانگ، به معنای افزایش ریسک در سامانه است و هر اندازه مقدار شاخص بیش‌تر شود بروز کم‌آبی شدیدتر و خسارات ناشی از آن بحرانی‌تر خواهد بود. در ادامه درصد تغییرات حاصل از اعمال هر سناریو در میزان شاخص‌های ریسک مخزن در جدول ۲ آورده شده است. مطابق جدول ۲، شاخص اطمینان‌پذیری هنگامی که سناریوی اول (کاهش مصرف آب به میزان پنج درصد) اعمال می‌شود چهار درصد نسبت به حالت بدون اعمال سناریو بهبود می‌یابد، در حالی که با اعمال سناریوی پنجم بهبود این شاخص ۱۴ درصد خواهد بود و نشان‌دهنده آن است که توانایی سامانه تأمین آب با کاهش تقاضا در بازه زمانی بهره‌برداری افزایش می‌یابد.

Table 1- Risk indexes in different adaptation alternatives (%)
جدول ۱- شاخص‌های ریسک در گزینه‌های مختلف سازگاری (درصد)

Without Reduction	Demand Reduction by 5%	Demand Reduction by 10%	Demand Reduction by 15%	Demand Reduction by 20%	Demand Reduction by 25%	Index
76	79	81	82	84	87	Reliability
11	10	9	8	7	6	Vulnerability
29	33	34	35	35	33	Resiliency
19	23	25	26	27	28	Loucks's Flexibility
33	30	28	28	26	25	Drought Risk
58	62	63	64	65	65	Ray's Sustainability
26	24	23	21	20	18	Yang's Modified SUI

Table 2- Percentage of change in indexes by applying scenarios
جدول ۲- درصد تغییرات شاخص‌ها در حالت اعمال سناریوها نسبت به حالت بدون اعمال سناریو

Scenario					Index
Fifth	Fourth	Third	Second	First	
+14	+10	+8	+6	+4	Reliability
-37	-28	-19	-10	-2	Vulnerability
+15	+20	+19	+18	+13	Resiliency
+39	+37	+32	+27	+19	Loucks's Flexibility
-24	-21	-15	-15	-10	Drought Risk
+12	+12	+10	+8	+6	Ray's Sustainability
-30	-23	-19	-11	-7	Yang's Modified SUI

The negative sign indicates a decrease and the positive sign indicates an increase in the index compared to the condition when scenarios are not applied

۴-۲- نتایج حاصل از روش کوپراس

در این گام با توجه به تغییر شاخص‌های ریسک، بهره‌بردار از مخزن باید تصمیم‌گیری کدام سیاست، سبب ایجاد بهترین رفتار سامانه در سال‌های آتی خواهد بود؟ آیا هر اندازه مصرف آب در پایاب سد کاهش یابد، سامانه به ایده‌آل نزدیک‌تر خواهد بود؟ استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با توجه به تعدد و تناقض در معیارها می‌تواند پاسخ این پرسش را روشن کند. در روش تصمیم‌گیری کوپراس، برای هر معیار عددی قطعی تخصیص داده می‌شود و سپس رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس گام‌های روش انجام می‌شود. در این قسمت نتایج حاصل از به‌کارگیری مدل کوپراس ارائه می‌شود. در گام نخست با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی بر مبنای مقایسات زوجی وزن معیارها مطابق جدول ۳ تعیین شد.

Table 3- Weights of criteria by using AHP method

جدول ۳- وزن معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی

Weight	Criteria
0.051	Reliability
0.049	Vulnerability
0.022	Resiliency
0.073	Loucks's Flexibility
0.175	Ray's Sustainability
0.236	Yang's Modified SUI
0.395	Drought Risk

در روش کوپراس ابتدا معیارهای منفی و معیارهای مثبت مشخص می‌شوند که در این پژوهش معیارهای آسیب‌پذیری، ریسک خشک‌سالی و پایداری اصلاح‌شده یانگ به‌عنوان معیارهای منفی و سایر معیارها مثبت در نظر گرفته شدند. سپس ارزیابی هر معیار در برابر هر گزینه انجام شد. در ادامه مجموع مقادیر نرمالیزه‌شده برای معیارهای مثبت و منفی محاسبه شدند که در جدول ۴ آورده شده است.

شاخص آسیب‌پذیری با کاهش تقاضا به میزان پنج درصد فقط دو درصد کاهش می‌یابد. در صورتی که تقاضا در پایاب سد ۲۵ درصد کاهش یابد آسیب‌پذیری سامانه ۳۷ درصد کاهش می‌یابد که بسیار قابل توجه است. شاخص برگشت‌پذیری با کاهش تقاضا افزایش می‌یابد یعنی با اعمال سناریوی اول سرعت سامانه برای عبور از حالت شکست به حالت پیروزی ۱۳ درصد بهبود می‌یابد و با کاهش تقاضای بیش‌تر سامانه سریع‌تر به وضعیت مطلوب دست پیدا می‌کند. شاخص پایداری لاکس که ترکیبی از سه شاخص اطمینان‌پذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری است، با اعمال سناریوهای سازگاری بهبود پیدا می‌کند. این شاخص با اعمال سناریوی اول ۱۹ درصد افزایش پیدا می‌کند که بیان‌گر آن است که پایداری سامانه در برابر تغییرات افزایش می‌یابد. شاخص ریسک خشک‌سالی با اعمال سناریوی اول ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که بدان معنا است که قدرت سامانه در تعدیل اثرات منفی ناشی از وقوع خشک‌سالی ۱۰ درصد افزایش می‌یابد و می‌تواند در زمان وقوع خشک‌سالی نیز تقاضای پایاب سد را تأمین کند. هر اندازه این شاخص بیش‌تر کاهش یابد رفتار سامانه به ایده‌آل نزدیک‌تر است. شاخص پایداری ری، پایداری سامانه در برابر تغییرات هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. افزایش شش درصد این شاخص با اعمال سناریوی اول به معنای آن است که هرچند تغییرات هیدرولوژیکی طبیعت در رفتار سامانه تأثیرگذار است اما مدیریت تقاضا می‌تواند اثرات ناشی از آن را به میزان شش درصد کاهش دهد. شاخص پایداری اصلاح‌شده یانگ که بیان‌کننده احتمال کم‌آبی در سامانه است، با اعمال سناریوی اول هفت درصد کاهش می‌یابد یعنی ریسک عملکرد سامانه هفت درصد کاهش می‌یابد و خسارت ناشی از کم‌آبی در اثر وقوع پدیده تغییر اقلیم هفت درصد کم‌تر می‌شود. با کاهش تقاضا به مقادیر بیش‌تر ریسک سامانه نیز کاهش می‌یابد.

در این روش نیز ابتدا معیارهای مثبت و معیارهای منفی مشخص می‌شوند. ابتدا ماتریس اولیه تصمیم‌گیری و ماتریس نرمال شده و ماتریس نرمالیزه موزون تشکیل شدند. با استفاده از روابط ذکر شده مقادیر P و R و Q مطابق جدول ۶ به دست آمدند.

Table 6- The values of the parameters of the Grey COPRAS method

جدول ۶- مقادیر پارامترهای روش کوپراس خاکستری			
Value of Q	Value of P	Value of R	Alternative
0.2155	0.0631	0.1172	First
0.2385	0.0597	0.0998	Second
0.1849	0.0631	0.1466	Third
0.1717	0.0669	0.1704	Fourth
0.1898	0.0657	0.1460	Fifth

در نهایت با محاسبه شاخص سودمندی، رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها به صورت جدول ۷ حاصل شد:

Table 7- The final ranking of the alternatives by Grey COPRAS method

جدول ۷- رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها براساس روش کوپراس خاکستری		
Ranking of Alternatives	Utility Degree	Alternative
Second Priority	90.339	First
First Priority	100	Second
Fourth Priority	77.507	Third
Fifth Priority	71.970	Fourth
Third Priority	79.569	Fifth

رتبه‌بندی گزینه‌ها در روش کوپراس خاکستری نسبت به روش کوپراس تغییر کرده و بهترین گزینه، گزینه دو یعنی کاهش تقاضای آب بخش کشاورزی به میزان ۱۰ درصد است. پس از انتخاب گزینه دو به عنوان بهترین گزینه، رتبه‌بندی گزینه‌ها به ترتیب شامل گزینه‌های یک، پنج، سه و چهار است. در جدول ۸ مقایسه‌ای از نتایج دو روش تصمیم‌گیری به طور خلاصه ارائه شده است.

با توجه به جدول ۸ در روش کوپراس خاکستری برخلاف روش کوپراس، گزینه دوم یعنی کاهش تقاضای بخش کشاورزی به میزان ۱۰ درصد به عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. سپس، گزینه اول (کاهش ۵ درصدی حجم تقاضا)، گزینه چهارم (کاهش ۲۰ درصدی حجم تقاضا)، سپس گزینه پنجم (کاهش ۲۵ درصدی حجم تقاضا) و در نهایت گزینه سوم به عنوان آخرین راه کار انتخاب شد.

Table 4- The values of the parameters for COPRAS method

جدول ۴- مقادیر پارامترهای روش کوپراس		
Value of	Value of	Alternative
0.1513	0.0614	First Alternative
0.1423	0.0632	Second Alternative
0.1386	0.0644	Third Alternative
0.1281	0.0656	Fourth Alternative
0.1196	0.0664	Fifth Alternative

مقادیر حاصل از محاسبه شاخص سودمندی و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

Table 5- Utility measure and priority of alternatives in COPRAS method

جدول ۵- شاخص سودمندی و رتبه‌بندی گزینه‌ها در روش کوپراس		
Ranking of Alternatives	Utility Degree	Alternative
Fifth Priority	83.07	First Alternative
Fourth Priority	87.36	Second Alternative
Third Priority	89.46	Third Alternative
Second Priority	94.93	Fourth Alternative
First Priority	100	Fifth Alternative

مطابق با جدول ۵ با استفاده از روش کوپراس بهترین گزینه برای سازگاری با اثرات پدیده تغییر اقلیم در بخش کشاورزی گزینه پنجم یعنی تغییر در الگوی کشت به نحوی که میزان آب مصرفی ۲۵ درصد کاهش یابد به عنوان بهترین راه کار سازگاری با تغییر اقلیم انتخاب شده است. رتبه‌بندی گزینه‌ها در روش کوپراس براساس شاخص سودمندی است. بنابراین پس از انتخاب گزینه پنجم، گزینه چهارم یعنی کاهش مصرف آب به میزان ۲۰ درصد به عنوان دومین راه کار انتخاب شده است. گزینه سوم به عنوان سومین راه کار مناسب سازگاری با تغییر اقلیم انتخاب شد. سپس گزینه دوم و در نهایت گزینه اول یعنی کاهش تقاضای بخش کشاورزی به میزان پنج درصد به عنوان آخرین اولویت سازگاری با پدیده تغییر اقلیم در بخش کشاورزی در حوضه آبریز قرنقو انتخاب شد.

۳-۴- نتایج حاصل از روش کوپراس خاکستری

در این گام نتایج حاصل از توسعه مفهوم خاکستری در روش کوپراس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش تخصیص تابع عضویت بالا و پایین برای در نظر داشتن عدم قطعیت‌ها برای تصمیم‌گیری آینده، مورد تأکید است. چرا که با تغییر در شرایط ممکن است نتایج کارایی پیشین خود را نداشته باشند. برای تصمیم‌گیران بسیار اهمیت دارد که با تغییر شرایط در اثر عوامل پیش‌بینی نشده، صحت سیاست‌های اتخاذ شده هم‌چنان پایرجا بماند.

Table 8- Comparison of the results of the decision-making methods**جدول ۸- مقایسه نتایج روش‌های تصمیم‌گیری**

Utility Degree		Ranking of Alternatives		
COPRAS Method	COPRAS-G Method	COPRAS Method	COPRAS-G Method	Alternative
83.07	90.339	Fifth Priority	Second Priority	First
87.36	100	Fourth Priority	First Priority	Second
89.46	77.507	Third Priority	Fourth Priority	Third
94.93	71.970	Second Priority	Fifth Priority	Fourth
100	79.569	First Priority	Third Priority	Fifth

- 11- Resiliency
- 12- Vulnerability
- 13- Air Compressor
- 14- Complex Proportional Assessment
- 15- Grey Complex Proportional Assessment
- 16- Loucks's Flexibility
- 17- Drought Risk
- 18- Ray Sustainability
- 19- Yang's Modified Sustainability
- 20- Relative Significance
- 21- Utility Degree
- 22- Principle of Information Difference
- 23- Principle of Non-Uniqueness
- 24- Principle of Minimal Information
- 25- Principle of Recognition Base
- 26- Principle of New Information Priority
- 27- Principle of Absoluteness of Greyness
- 28- Mapping
- 29- Grey Possibility Number
- 30- Gharranhu Basin
- 31- Water Evaluation and Planning
- 32- Atmosphere-Ocean General Circulation Model
- 33- Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow Data

۶- مراجع

- Ashofteh P-S, Bozorg-Haddad O, Mariño M A (2013) Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139 (2):85-97
- Ashofteh P-S, Rajaei T, Golfam P (2017) Assessment of water resources development projects under conditions of climate change using Efficiency Indexes (EIs). *Journal of Water Resources Management* 31(12):3723-3744
- Banihabib M E, Shabestari M H, Hosseinizadeh M (2017) Hybrid Model for Strategic Management of Agricultural Water Demand in Arid Regions. *Iran-Water Resources Research* 12(4):60-69 (In Persian)
- Belton V, Stewart T (2002) Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Springer US

۵- خلاصه و جمع‌بندی

هدف از انجام این تحقیق، رتبه‌بندی و انتخاب بهترین گزینه برای سازگاری در بخش کشاورزی با اثرات پدیده تغییر اقلیم با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس و کوپراس خاکستری است. بدین منظور ابتدا شاخص‌های ریسک سامانه تأمین آب به‌عنوان معیارهای تصمیم‌گیری انتخاب و با استفاده از نتایج حاصل از مدل WEAP محاسبه شدند. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن دهی شدند. سپس با استفاده از دو روش کوپراس و کوپراس خاکستری، اولویت‌بندی گزینه‌ها و انتخاب بهترین گزینه انجام شد که در روش کوپراس گزینه پنجم به‌عنوان گزینه برتر انتخاب شود، اما روش کوپراس خاکستری که از تلفیق مفاهیم خاکستری با روش کوپراس ایجاد شده، گزینه دوم را بهترین گزینه معرفی کند.

استفاده از مفاهیم تئوری خاکستری در تلفیق با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب سیاست‌های مناسب در سال‌های آینده و در شرایطی که پیش‌بینی رفتار سامانه‌های تأمین آب تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم همراه با عدم قطعیت‌های فراوان است، می‌تواند بسیار مفید باشد، چرا که اطلاعات مربوط به تغییرات آینده از نوع اطلاعات خاکستری است که بخشی از آن مربوط به وضعیت فعلی است که به طور کامل واضح است اما اطلاعات مربوط به آینده با ابهامات فراوانی روبه‌رو است.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Water Bankruptcy
- 2- Multi-Criteria Decision Making
- 3- Rational
- 4- Justifiable
- 5- Technique for Order Preference by Similarity
- 6- Fuzzy Ordered Weighted Averaging
- 7- Analytical Hierarchy Process
- 8- Strengths, Weakness, Opportunities, Threats
- 9- Risk Indexes
- 10- Reliability

- Ray PA, Vogel RM, Watkins DW (2010) Robust optimization using a variety of performance indices. World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, Providence, RI, 4710-4719, 16-20 May
- Razavi Toosi S L, Samani J M V, Fahmi H (2015) A new fuzzy analytical network process method for watershed ranking. *Iran-Water Resources Research* 11(1):61-72 (In Persian)
- Razavi Toosi S L, Samani J M V, Koorehpazan Dezfuli A (2007) Ranking inter-basin water resources projects using fuzzy multiple attribute group decision making method. *Iran-Water Resources Research* 3(2):1-9 (In Persian)
- Razavi Toosi S L, Samani J M V, Koorehpazan Dezfuli A (2011) Comparison of fuzzy multiple attribute group decision making methods for ranking water transfer projects. *Iran-Water Resources Research* 7(3):1-12 (In Persian)
- Razavi Toosi SL, Samani JMV (2017) Prioritizing watersheds using a novel hybrid decision model based on fuzzy DEMATEL, Fuzzy ANP and Fuzzy VIKOR. *Journal of Water Resources management* 31(9):2853-2867
- Sandoval-Solis S, McKinney D, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137:381-390
- Srdjevic B, Medeiros YDP, Faria AS (2004) An objective multi-criteria evaluation of water management scenarios. *Journal of Water Resources Management* 18:35-54
- Talebi E, Ghorbani MA, Daneshfaraz R (2013) Prioritization of water allocation of Ghashlagh Dam in Sanandaj Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). The 5th Iranian Water Resources Management Conference (In Persian)
- Yang TC, Chen C, Kuo CM, Tseng HW, Yu PS (2012) Drought risk assessments of water resources systems under climate change: a case study in Southern Taiwan. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9:12395-12433
- Zarghami M, Ehsani I (2011) Evaluation of different group multi-criteria decision making methods in selection of water transfer projects to Urmia Lake Basin. *Iran-Water Resources Research* 7(2):1-14 (In Persian)
- Zarghami M, Szidarovszky F, Ardakanian R (2008) A fuzzy-stochastic OWA model for robust multi-criteria decision making. *Journal of Fuzzy Optim Decis Making* 7:1-15
- Caraca C, Ulutaş A, Yamaner G, Topal A (2018) The selection of the best Olympic place for Turkey using an integrated MCDM model. *Journal of Science Decision Letters* 8(1):1-16
- Chen M, Tzeng G (2004) Combining grey relation and TOPSIS concepts for selecting an expatriate host country. *Journal of Mathematical and Modelling* 40(13):1473-1490
- Deng JL (1982) Control problems of grey systems. *Journal of System and Control Letters* 5:288-294
- Gallego-Ayala J, Juizo D (2011) Strategic implementation of integrated water resources management in Mozambique: An A'WOT analysis. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth A/B/C* 36 (14-15):1103-1111
- HashemKhani-Zolfani S, Rezaeiniya N, Aghdaie MH, Zavadskas EK (2012) Quality control manager selection based on AHP-COPRAS-G methods: A case in Iran. *Journal Economic Research* 25(1):72-86
- Hashimoto T, Stedinger JR, Locks DP (1982) Reliability, resiliency, vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Journal of Water Resources Research* 18(1):14-20
- Ho W, Xu X, Dey PK (2010) Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *Journal of Operational Research* 202:16-24
- Jiang Y-X, Liu Y-S, Y G-G, Wang H-W, Liang Y-Q, Chen X-W (2015) A new tool for assessing sediment quality based on the weight of evidence approach and Grey TOPSIS. *Journal of Science of the Total Environment* 537(15):369-376
- Kundakci N, Tuş Işık A (2016) Integration of MACBETH and COPRAS methods to select air compressor for a textile company. *Journal of Decision Science Letters* 5(3):381-394
- Li GD, Yamaguchi D, Nagai M (2007) A grey-based decision-making approach to the supplier selection. *Journal of Mathematical and Computer Modelling* 46(3-4):573-581
- Locks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Journal of Hydrological Sciences* 42 (2):513-530
- Locks DP, Van Beek E (2005) Water resources systems and planning and management. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris
- Mendoza VM, Villanuava EE, Adem J (1997) Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Journal of Climate Research* 9:139-145

Zongxue X, Jinno K, Kawanura A, Takesaki S, Ito k
(1998) Performance risk analysis for Fukouka water
supply system. Journal of Water Resources
Management 12:13-30

Zavadskas E, Kaklauskas A (1996) Determination of an
efficient contractor by using the new method of
multi-criteria assessment. Journal of Shaping Theory
and Practice 94-104