تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هجدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱
Volume 18, No. 1, Spring 2022 (IR-WRR)
۱۸۰-۲۰۷

ارزیابی تاب‌آوری طرح‌های مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز بر پایه ویژگی‌های گرودارن

مسعود بهبودیان[۱*]، رضا کراچیان[۲] و نجمه مهجوری مجد[۳]

چکیده

در سال‌های اخیر، رویکردهای ارزیابی تاب‌آوری سیاست‌های مدیریت منابع آب، به ویژه در شرایط حدی، مورد توجه پژوهشگران قرار داشته است. تاب‌آوری توانایی ایستادن در برابر بحران یا چالش‌های پی‌درپی است به‌گونه‌ای که سیستم با استواری مناسب قابلیت بازگشت به تعادل یا عملکرد قابل قبول یا سطوح بالاتر عملکردی را داشته باشد. ارزیابی تاب‌آوری سناریوهای عرضه و تقاضای سامانه‌های منابع آب در سطح حوضه آبریز با درنظر گرفتن ویژگی‌های سازمانی گرودارن به‌صورت مناسب بررسی نشده است. با توجه به وجود گرودارن مختلف در حوضه آبریز، برای تصمیم‌گیری در تعیین سناریوهای مناسب مدیریتی، لازم است قدرت، جایگاه سازمانی و مطلوبیت‌ها و محدودیت‌های گرودارن به شکل مناسبی درنظر گرفته شوند. در این مقاله، ابتدا ارزیابی تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب در برابر رخدادهای با احتمال مشخص و نامشخص انجام می‌شود. در ادامه، سناریوهای تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب در سطح حوضه آبریز زرینه‌رود، که مهم‌ترین زیرحوضه موجود در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است، با توجه به یک روش تصمیم‌گیری چند عامله- چند معیاره تحلیل شده، نتایج آن با یک روش تصمیم‌گیری که در آن نقش گرودارن درنظر گرفته نشده است، مقایسه می‌شود. در همین راستا و با توجه به وجود گرودارن با جایگاه‌های سازمانی مختلف و مطلوبیت‌های متفاوت، به منظور تعیین سناریوهای برتر، از ترکیب بازی پیشرو- پیرو و رویکرد استنتاج شهودی (Evidential Reasoning) مبتنی بر معیار تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب و هزینه‌ای اجرای سناریوها استفاده می‌شود. بر پایه نتایج به دست آمده، در حالتی که تصمیم‌گیری بدون درنظرگیری ویژگی‌های گرودارن انجام شود، سناریوی منتخب توجیه اقتصادی ندارد و هزینه اجرایی آن ۲۱ درصد بیشتر از سناریویی است که با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره انتخاب می‌شود. همچنین، اختلاف مقادیر تاب آوری عرضه و تقاضای آب در سناریوهای منتخب در دو روش تصمیم‌گیری کم است و وضعیت تاب‌آوری سناریوهای منتخب در هر دو حالت مناسب ارزیابی می‌شود. در نهایت، ارزش سناریوی برتر در روش تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره و در سطح پیشروها برابر ۰/۷۲ ارزیابی شده است. بنابراین، در استفاده از بازی پیشرو- پیرو، سناریوی منطقی‌تری انتخاب می‌شود، به گونه‌ای که سناریوی منتخب تاب آوری و هزینه مناسبی دارد.

کلمات کلیدی: ساختار سازمانی گرودارن، تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب، بازی پیشرو- پیرو، رویکرد استنتاج شهودی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۲۵

۱- دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۱ امکانپذیر است.

Evaluating the Resilience of Water Resources Management Projects in River Basins Considering Stakeholders Characteristics

M. Behboudian[1], R. Kerachian[2], and N. Mahjouri[3]*

Abstract

In recent years, methods for evaluating the resilience of water resources management projects, especially during extreme conditions, have attracted much attention from researchers. Resilience is the ability of a system to withstand crises or successive difficulties so that it can recover or reach an acceptable level of performance. In previous works, the assessment of resilience of water supply and demand scenarios throughout a river basin has not been adequately researched. In addition, to decide on determining appropriate management scenarios, it is necessary to consider the powers, organizational positions and limitations of different stakeholders. In this paper, first, the resilience of a water supply-demand system under events with known and unknown probabilities is evaluated. In the next step, scenarios of water supply and demand resilience in Zarrinehrud river basin, which is the most important sub-basin of the Lake Urmia basin, are analyzed using a multi-agent-multi-criteria decision-making method. Then, the results are compared with those of a decision-making method without considering the role of stakeholders. Finally, to consider stakeholders utilities and powers, a combination of a leader-follower game and evidential reasoning (ER) approach is used to determine appropriate scenarios. The results showed that in the decision-making method with one level (without leader-follower game), the implementation cost of the selected scenario is 21% higher than that of the scenario selected using the multi-agent-multi-criteria decision-making method. Also, the difference between supply-demand resilience of the selected scenarios using the two methods is low and the resilience of the selected scenarios in both methods are appropriate. Finally, the payoff of the selected scenario in the multi-agent-multi-criteria decision-making method is estimated to be 0.72. Therefore, in using the leader-follower game, a more logical scenario is selected, so that the selected scenario has a reasonable resilience and cost.

Keywords: Organizational Structure of Stakeholders, Water Supply-Demand Resilience, Leader-Follower Game, Evidential Reasoning Approach.

Received: March 3, 2022

Accepted: May 15, 2022

1- Research Assistant (Ph.D.), School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: behboodian@ut.ac.ir

2- Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: kerachian@ut.ac.ir

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran, Email: mahjouri@ut.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: 20.1001.1.17352347.1401.18.1.12.0

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

افزایش جمعیت و به دنبال آن افزایش روزافزون نیازهای آب در بخش‌های مختلف شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست از یک‌سو و محدودیت منابع آب در دسترس از سوی دیگر، مدیریت صحیح این منابع را امری اجتناب‌ناپذیر ساخته است. به منظور اتخاذ تصمیم‌های آگاهانه در برنامه‌ریزی و مدیریت مناسب منابع آب، ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های منابع آب موضوع بسیار مهمی است (Karamouz Et al., 2016؛ Karamouz and Zahmatkesh, 2017؛ Behboudian et al., 2021a). برای ارزیابی تاب‌آوری معیارهای مناسبی وجود دارند که این معیارها به منظور کمی کردن میزان تاب‌آوری در برابر رخدادهای با احتمال مشخص و نامشخص قابل استفاده هستند (Sweetapple et al., 2018؛ Behboudian et al., 2021b). علاوه بر ارزیابی تاب‌آوری، ارائه سناریوهای بهبود تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب برای بهبود شرایط منطقه لازم و ضروری است. در این راستا، با مدنظر قرار دادن شرایط فعلی محدوده مورد مطالعه و پتانسیل‌های موجود، سناریوهای اشاره شده به‌منظور بهبود شرایط موجود تعریف و تحلیل می‌شوند. در این زمینه، Wang et al. (2009) به بررسی مفاهیم تاب آوری با کاربرد آنها در سامانه‌های منابع آب پرداختند. این پژوهش، سه جنبه تاب‌آوری را در سامانه‌های منابع آب درنظر می‌گیرد: ۱- تاب آوری مربوط به بیشینه تنش قابل تحمل بدون عبور از آستانه عملکرد سامانه؛ ۲- تاب‌آوری سامانه در پاسخ به بحران و برگشت‌پذیری آن پس از رخداد شرایط بحرانی؛ و ۳- ظرفیت سازگارشوندگی سامانه. محققان استدلال کرده‌اند که ظرفیت سازگارشوندگی یک سامانه بهتر است به‌عنوان متغیر ورودی دو جنبه دیگر تاب‌آوری درنظر گرفته شود و جنبه دوم تنها زمانی مدنظر قرار گیرد که سامانه از آستانه عملکرد خود عبور نکند. در نهایت، محققان پایش و تنظیم سامانه را در برنامه ریزی بلندمدت برای افزایش تاب‌آوری بسیار مهم تلقی کرده‌اند. Behzadian et al. (2014) عملکرد طرح‌های بازیافت آب را در سامانه‌های آب شهری بر پایه تاب‌آوری ارزیابی کردند. در این تحقیق، یک الگوریتم تکاملی چندهدفه برای شناسایی جبهه بهینه پارتو با درنظر گرفتن سه هدف افزایش تاب‌آوری، افزایش اطمینان‌پذیری و کاهش هزینه استفاده شد. کاربرد رویکرد پیشنهاد شده در یک مطالعه واقعی، اهمیت استفاده از معیار تاب‌آوری را برای تعیین طرح‌های مناسب نشان داد. در نهایت، نتایج ایشان نشان دادند که طرح جمع آوری باران نقش مهمی در بهبود شاخص تاب‌آوری داشت. Karamouz and Zahmatkesh (2017) به کمّی‌سازی تاب‌آوری و عدم قطعیت در برابر رخدادهای سیل پرداختند و از آن به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری شهری استفاده کردند. در این تحقیق، تاب‌آوری معادل ظرفیت رسیدن سامانه به سطح قابل قبول عملکرد در طول رخداد سیل و پس از سیل تعریف شده است. همچنین، شاخص‌های افزونگی[۱]، تدبیر[۲]، قدرت[۳] و سرعت در برگشت[۴] مبتنی بر شرایط اجتماعی- اقتصادی، انسانی و طبیعی به‌منظور تعیین تاب‌آوری ساحلی توسعه داده شده است.

Behboudian and Kerachian (2021) به ارزیابی تاب‌آوری سناریوهای مدیریت منابع آب در حوضه آبریز زرینه‌رود پرداختند. در این مقاله، محققان پنج معیار مبتنی بر مفهوم تاب‌آوری در حوضه مورد مطالعه تعریف کردند که توانایی تحلیل تاب‌آوری را در برابر تنش‌های با احتمال مشخص و نامشخص داشت. در گام آخر و با یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر روش استنتاج شهودی[۵]، معیارهای تاب‌آوری با یکدیگر ترکیب شدند تا سناریوهای مدیریت منابع آب ارزیابی شوند. در این تحقیق، ساختار سلسله‌مراتبی و قدرت گروداران درنظر گرفته نشده است. نتایج این تحقیق نشان دادند سناریویی که در آن نیاز کشاورزی تا سال ۲۰۲۳ به اندازه ۴۰ درصد کاهش می‌یابد، بهترین سناریو برای بهبود شرایط حوضه مورد مطالعه خواهد بود. Behboudian et al. (2021b) روش جدیدی را برای ارزیابی تاب‌آوری بلندمدت سامانه‌های منابع آب با احتمال وقوع مشخص و نامشخص با استفاده از رویکرد تلفیق معیارها بر پایه درجه‌های باور[۶] ارائه دادند. در این تحقیق، ابتدا عملکرد بلندمدت سامانه ارزیابی و سپس، معیار جدیدی برای ارزیابی تاب‌آوری ارائه شد. در این شاخص، تاب‌آوری توسط پنج معیار اصلی مقاومت، افزونگی، تدبیر، سرعت در بازگشت و دوام[۷] و زیرمعیارهای متعدد در ابعاد مختلف هیدرولوژیکی، سیاسی، اقتصادی، محیط‌زیستی و سازمانی و همچنین، معیارهای اجتماعی مانند ارتباط گروداران و مشارکت برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های منابع آب سنجیده شد. در نهایت، نیز سناریوهای مختلف ارتقاء تاب‌آوری منابع آب در شرایط حدی اقلیمی با استفاده از نظریه استنتاج شهودی ارزیابی شدند. Pourmoghim et al. (2022) یک چارچوب مبتنی بر عدم قطعیت برای ارزیابی و بهبود تاب‌آوری طولانی‌مدت دریاچه‌ها تحت خشکسالی‌های انسان‌ساخت پرداختند. ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی برای ارزیابی تاب‌آوری دریاچه در برابر خشکسالی دارای چهار سطح است. سطح اول شامل چندین شاخص همچون تاب‌آوری بلندمدت، اطمینان‌پذیری و هزینه اجرا است. در سطوح دوم تا چهارم، چهار معیار اصلی مبتنی بر تاب‌آوری (یعنی قدرت، تدبیر، افزونگی و سرعت در برگشت) و برخی زیرمعیارهای کمّی و کیفی با درنظر گرفتن عوامل مؤثر بر وضعیت اکولوژیکی دریاچه‌ها تعریف شده‌اند. پس از برآورد سری زمانی سالانه تاب‌آوری، شاخص‌های مختلفی همچون زمان بازیابی (Recovery time) و تاب‌آوری از دست رفته تعریف شدند و بر مبنای آنها سناریوهای احیا

تحلیل شدند.

در مسائل واقعی مدیریت منابع آب و محیط‌زیست، همواره تصمیم گیرندگان متعددی با قدرت و تراز سازمانی مختلف و همچنین با مطلوبیت‌ها و محدودیت‌های متنوعی در فرایند تصمیم‌گیری درگیر هستند. بنابراین، بهتر است از مدل‌های تصمیم‌گیری چندسطحی گرووداران برای حل این مسائل استفاده کرد (Chen et al., 2017; Wu et al., 2018). Hamalainen et al. (2001) یک چارچوب مدل‌سازی چندمعیاره و سامانه تصمیم‌یار با چند گرودار را در مدیریت منابع آب ارزیابی کردند. در این چارچوب، گروداران در فرایند تصمیم گیری از مرحله تشکیل ساختار مشارکتی تا مرحله توافق گروهی (جستجوی پذیرش عمومی برای یک سیاست) درگیر شده‌اند. هدف این چارچوب ایجاد یک فرایند یادگیری تکاملی بوده است. در این تحقیق، از یک روش تعاملی جدید برای یافتن گزینه‌های مطلوب استفاده شده است. همچنین، رویکرد برنامه‌ریزی ترجیحی[8] برای جمع آوری نظرات متخصصان در ارزیابی نهایی گزینه‌ها توصیف شده است. Geng and Wardlaw (2013) تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره را برای مدیریت یکپارچه منابع آب استفاده کردند. در این پژوهش، روش های تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌منظور تلفیق اهداف مختلف در فرایند برنامه‌ریزی، مدیریت و تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا، مجموعه‌ای از سناریوهای مختلف مدیریت، شامل کاهش مناطق آبیاری، بهبود کارایی آبیاری، افزایش کمبود سیستم برای آبیاری زیرزمینی و تغییر الگوی کاشت برای رسیدن به اهداف مورد نظر ارائه شده است. همچنین، یک مدل یکپارچه بهینه‌سازی منابع آب (IWRO[9]) برای بهینه‌سازی تخصیص آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده شده است. در ادامه، روش برنامه‌ریزی سازشی (CP[10]) به‌عنوان یک راه‌حل ایده‌آل برای تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره در مطالعه موردی تحقیق اتخاذ شده است. طبق نتایج، برنامه‌ریزی سازشی توانسته است راه‌حل‌های رضایت‌بخشی ارائه کند. در انتها، کارایی گزینه‌های مختلف بر مبنای تحلیل روش CP ارزیابی و گزینه‌های تصمیم‌گیری بالقوه برای تحقیقات بیشتر پیشنهاد شدند. Safari et al. (2014) کاربرد مدل چانه‌زنی نش و رویکرد پیشرو- پیرو را در تخصیص آب در حوضه رودخانه زرینه‌رود بررسی کردند. در این تحقیق، روش جدیدی برای حل اختلافات بین کاربران مختلف آب و تأمین کنندگان آب با درنظر گرفتن نیازهای محیط‌زیستی و محدودیت‌های سامانه پیشنهاد شد. همچنین، یک مدل دو سطحی پیشرو- پیرو برای به بیشینه کردن سود خالص درنظر گرفته شد که در آن شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌عنوان پیشرو و کاربران کشاورزی، شهری و صنعتی به‌عنوان پیروان تحت محدودیت سامانه اعمال شدند. روش پیشنهاد شده در حوضه آبریز زرینه‌رود که یکی از مناطقی است که با کمبود آب مواجه است، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشـــان دادند که مطلوبیت پیشرو در مدل پیشرو- پیرو در مقایـــسه بـــا راه‌حـــل‌های چانه‌زنی نش افزایش یافته است. Chen et al. (2017) یک روش تعاملی پیشرو- پیرو برای مدیریت منابع آب منطقه‌ای با درنظرگیری نیازهای آبی مختلف و محدودیت‌های محیط‌زیستی ارائه دادند. این مطالعه فرمولاسیون و پیاده‌سازی یک چارچوب بهینه‌سازی بر اساس دسترسی به آب و اطمینان‌پذیری همراه با ویژگی‌های مختلف نیاز آب ارائه داده است. این چارچوب به‌طور همزمان مجموعه‌ای از اهداف تعاملی پیشرو- پیرو را که توسط تصمیم‌گیرندگان مختلف در طول بهینه‌سازی ایجاد شده است، ادغام کرد. در این روش، پیشرو میزان دبی بهینه آلاینده را برای برآورده کردن هدف محیط‌زیستی تعیین کرد. در گام بعد، پیرو اطلاعات بهینه شده از پیشرو را دریافت نموده، آن را در بهینه‌سازی تخصیص آب، برای به بیشینه‌سازی مزایای اقتصادی استفاده کرد. نتایج این تحقیق نشان دادند که مدل توسعه داده شده در مقایسه با مدل‌های تک‌سطحی دارای کارایی بیشتری هستند. Liu et al. (2017) به ارزیابی، رتبه‌بندی و انتخاب پروژه‌ها توسط متخصصان مختلف با استفاده از رویکرد استنتاج شهودی (ER) پرداختند. در رویکرد پیشنهادی، یک روش تحلیلی برای اعمال معیارهای ارزیابی کیفی با نمرات ارزیابی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و وزن‌های سازگاری معیارها و مطلوبیت‌های منسوب به نمره‌های ارزیابی به مدل مبتنی بر رویکرد ER معرفی شده است. یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی نیز برای آموزش وزن‌ها و مطلوبیت‌ها طراحی شده است. داده‌های اعتبارسنجی نشان دادند که نتایج ارزیابی با استفاده از وزن‌ها و مطلوبیت‌های بخش آموزش قابل اعتمادتر و سازگار با واقعیت بودند. Behboodian and Kerachian (2019) پایداری سناریوهای مدیریت منابع آب را بر مبنای رویکرد استنتاج شهودی (ER) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی کردند. آنها به این منظور، از یک مدل تخصیص آب استفاده و سه معیار معروف اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را در دریاچه ارومیه ارزیابی کردند. در گام بعد، پایداری سناریوهای مدیریت منابع آب در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در قالب تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی شد. نتایج نشان دادند که سناریوی متناظر با تأمین کامل حقابه دریاچه منجر به کاهش تخصیص آب به بخش کشاورزی شده است که ممکن است تبعات اجتماعی- فرهنگی- سیاسی مختلفی در بر داشته باشد. علی‌رغم کاهش حقّابه بخش کشاورزی در سناریوی تخصیص کامل نیاز آب دریاچه ارومیه نسبت به تأمین بخشی از نیاز دریاچه، سناریوی تأمین کامل حقابه دریاچه به‌عنوان سناریوی برتر انتخاب شد.

Behboudian et al. (2021a) سناریوهای مدیریت خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی در حوضه آبریز را با درنظرگرفتن ساختار سلسه مراتبی گرودارن و با یک رویکرد تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره ارزیابی کردند. در این تحقیق، شش سناریوی مدیریت منابع آب تعریف شد و هرکدام از سناریوها مبتنی بر معیارهای تعریف شده و یک بازی پیشرو- پیرو با استفاده از رویکرد استنتاج شهودی ارزیابی شدند. روش پیشنهاد شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به کار گرفته شد. در نهایت، سناریویی که ۱۰۰ درصد نیاز دریاچه ارومیه را تأمین می‌کند، به‌عنوان بهترین سناریو انتخاب شد. این سناریو پیشنهاد می‌کند سطح زیر کشت محصولاتِ غالب کاهش داده شود و از شیوه‌های کم‌آبیاری استفاده شود. Ashrafi et al. (2022) به ارزیابی و بهبود پایداری خدمات اکوسیستم در حوضه‌های آبریز تحت اثر تغییر اقلیم پرداختند. در این مقاله، ۱۲۸ سناریوی مدیریت منابع آب با درنظرگرفتن پروژه‌های تعریف شده توسط ستاد احیای دریاچه ارومیه درنظر گرفته شد. تمام خدمات اکوسیستم ارزیابی شدند و در نهایت، یک رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر COPRAS[11] برای تعیین بهترین سناریوی تحت اثر تغییر اقلیم استفاده شد. طبق نتایج، سناریوی حاوی پروژه‌های تخصیص آب به دریاچه از منابع جدید، احیای شبکه‌های آبیاری و زهکشی و اصلاح الگوی کشت به‌عنوان سناریوی برتر انتخاب شد.

مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که مطالعات معدودی در زمینه کاربرد سامانه‌های تصمیم‌گیری چندعامله- چندمعیاره مبتنی بر تاب آوری عرضه و تقاضای آب در تعیین سناریوهای برتر برای بهبود شرایط سامانه استفاده شده است. به همین منظور، در این مقاله، ابتدا گرودارن مختلف با قدرت‌های متفاوت مدنظر قرار می‌گیرند. سپس، با در نظرگیری بازی پیشرو- پیرو و تحلیل شبکه گرودارن، نقش آنها در انتخاب سناریوی برتر، مدیریت تاب‌آوری عرضه و تقاضای سامانه‌های منابع آب مد نظر قرار می‌گیرد. در ادامه، خروجی این روش با یک روش تصمیم‌گیری، که در آن نقش گرودارن مد نظر قرار نگرفته است (Behboudian and Kerachian, 2021)، مقایسه می‌شود. علاوه بر موارد مذکور، معیارها و زیرمعیارهایی کمّی و کیفی در تحلیل تاب‌آوری وجود دارند که لازم است با استفاده از یک رویکرد مناسب برای تحلیل تاب‌آوری کل، هم معیارها و زیرمعیاهای کمّی و کیفی را مدنظر قرار داد و هم عدم قطعیت‌های احتمالی در مسئله را به شکل مناسب درنظر گرفت. بنابراین، در سامانه تصمیم‌گیری ارائه شده در این مقاله، رویکرد استنتاج شهودی در کنار بازی پیشرو- پیرو و ساختار سازمانی گرودارن درنظر گرفته می‌شود، که در مطالعات گذشته همچون مقاله Behboodian and Kerachian (2019)، Pourmoghim et al. (2022) و Ashrafi et al. (2022) تلفیق این مفاهیم به شکلی خیلی محدود در مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است. به عبارت دیگر، تراز سازمانی گرودارن مدنظر قرار گرفته نشده است و تصمیمات در یک سطح اتخاذ شده‌اند. اما در این مقاله، جایگاه سازمانی گرودارن مدنظر قرار گرفته است و با تلفیق آن با یک فرآیند تصمیم‌گیری چندعامله- چندمعیاره و بازی پیشرو-پیرو سناریوی برتر انتخاب شده است. این امر به انتخاب سناریوی برتر تاب‌آوری عرضه و تقاضای سامانه‌های آب با درنظر گرفتن قدرت‌های مختلف گرودارن و معیارهای مهم آنها کمک می‌کند. از این رو، نوآوری اصلی این مقاله ارزیابی سناریوهای مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز مبتنی بر معیار تاب‌آوری و بر پایه ویژگی‌های گرودارن با قدرت و جایگاه سازمانی متفاوت است که درنظرگیری این ویژگی‌ها می‌تواند نقش مؤثری در تعیین طرح‌های مناسب مدیریتی ایفا کند. اجرای این فرآیند در حوضه‌های آبریزی همچون حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه تاب‌آوری محدوده با درنظرگیری مسائلی همچون جلوگیری از کاهش سطح و تراز آب دریاچه، بروز مشکلات محیط‌زیستی، تعامل بیشتر ذینفعان در تصمیم‌گیری‌ها، تأمین مناسب آب در گره‌های نیاز مختلف و کاهش آسیب‌پذیری سیستم شود.

۲- روش تحقیق

۲-۱- منطقه مطالعاتی

دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین دریاچه‌های آب شور جهان است. مساحت حوضه دریاچه ارومیه تقریباً ۵۱۰۰۰ کیلومتر مربّع است و این حوضه ۳/۷ میلیون نفر جمعیت دارد. این دریاچه به‌عنوان یک ذخیره گاه زیست‌کره شناخته شده و از سال ۱۹۷۶ به‌عنوان یک پارک ملی معرفی شده است. در دو دهه گذشته، سطح کشت زمین‌های کشاورزی حوضه دریاچه ارومیه بیش از هفت برابر افزایش یافته است (Emami and Koch, 2019). افزایش قابل توجه تقاضای آب (افزایش هفت برابری در بخش کشاورزی در حوالی دریاچه از سال ۲۰۰۰) و اثرات منفی ناشی از تغییرات آب و هوایی (تغییر روند بارش و دما) باعث کاهش شدید جریان آب ورودی شده است، که از سال ۱۹۹۵ به بعد منجر به کاهش تراز آب در دریاچه ارومیه شده است.

حوضه آبریز زرینه‌رود با مساحت تقریبی ۱۲۰۲۵ کیلومتر مربع به‌عنوان مهم‌ترین زیرحوضه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه شناخته شده است که در ′۴۷ °۴۵ تا ′۲۰ °۴۷ طول جغرافیایی و ′۴۱ °۳۵ تا ′۲۷ °۳۷ عرض جغرافیایی واقع است (شکل ۱). این زیرحوضه دربردارنده رودخانه زرینه‌رود با طول تقریبی ۳۰۰ کیلومتر است که از کوه‌های چهل‌چشمه در استان کردستان سرچشمه می‌گیرد و از ناحیه جنوبی به

دریاچه ارومیه می‌ریزد. متوسط دمای سالانه در حوضه رودخانه زرینه‌رود بین ۸ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد تغییر می‌کند. همچنین، سد بوکان با ظرفیت ۷۶۰ میلیون متر مکعب و بند انحرافی نوروزلو، مهم ترین سدهای عملیاتی در حوضه رودخانه زرینه‌رود است. شهرهای میاندوآب، شاهین‌دژ، تکاب و سقز چهار شهر بزرگ این حوضه آبریز هستند که جمعیت شهرهای مذکور جمعاً ۶۰۵۰۰۰ نفر است.

فصل رشد محصولات عمده از اواسط بهار تـا اواسط پاییز است و نیاز آبی آبیاری از منابـع سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شـود. رودخـانه زرینه‌رود مساحت معادل ۷۴۳۱۸ هکتار از محصولات مختلفی مانند گندم، جو، یونجه، سیب‌زمینی، گـوجه فرنگی، چغندرقند و سیب را آبیاری می‌کند. از منابع آب زیرزمینی در زیرحوضه زرینه‌رود می‌توان به آبخوان دشت میاندوآب اشاره کرد. آبخوان دشت میاندوآب با وسعت ۱۲۵۶ کیلومتر مربع، از ۹۹۹/۷۲ میلیون مترمکعب آب مصرفی در منطقه، ۳۵۱/۲۶ میلیون مترمکعب (حدود ۳۵ درصد از کل مصارف) را تأمین می‌کند. عمده برداشت از آب زیرزمینی در محدوده دشت میاندوآب از طریق چاه‌ها (عمیق و نیمه‌عمیق) صورت می‌گیرد. حجم اصلی برداشت توسط چاه‌ها ۹۶/۸ درصد و پس از آن تخلیه توسط چشمه‌ها و قنات‌ها به‌ترتیب با ۲/۶ و ۰/۶ درصد حجم برداشتی هستند (Pourmoghim et al., 2022). حجم کل آبخوان آبرفتی دشت میاندوآب ۱۷۵۸/۴ میلیون مترمکعب و حجم ذخیره تجدیدشونده و ثابت آبخوان آبرفتی به‌ترتیب ۳۴۳/۲۷ و ۱۴۱۵/۱۳ میلیون مترمکعب است. حجم پویای (تجدیدشونده) آب در سازندهای سخت محدوده مطالعاتی بر اساس اطلاعات بیلان هیدروکلیماتولوژی ارتفاعات، ۷۹/۴۱ میلیون مترمکعب برآورد شده است.

۲-۲- شبیه‌سازی محدوده مطالعاتی

مدل SWAT یک مدل فیزیکی است که برای پیش‌بینی اثر مدیریت اراضی[۱۲] بر آب، رسوب و بخش کشاورزی در یک مقیاس بزرگ با درنظر گرفتن کاربری خاک (نوع خاک)، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی مختلف در یک دوره بلندمدت به کار گرفته می‌شود. این مدل شبیه‌سازی برای برقراری ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی از اطلاعات به‌خصوصی همچون اطلاعات آب و هوایی، خصوصیات خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی استفاده می‌کند.

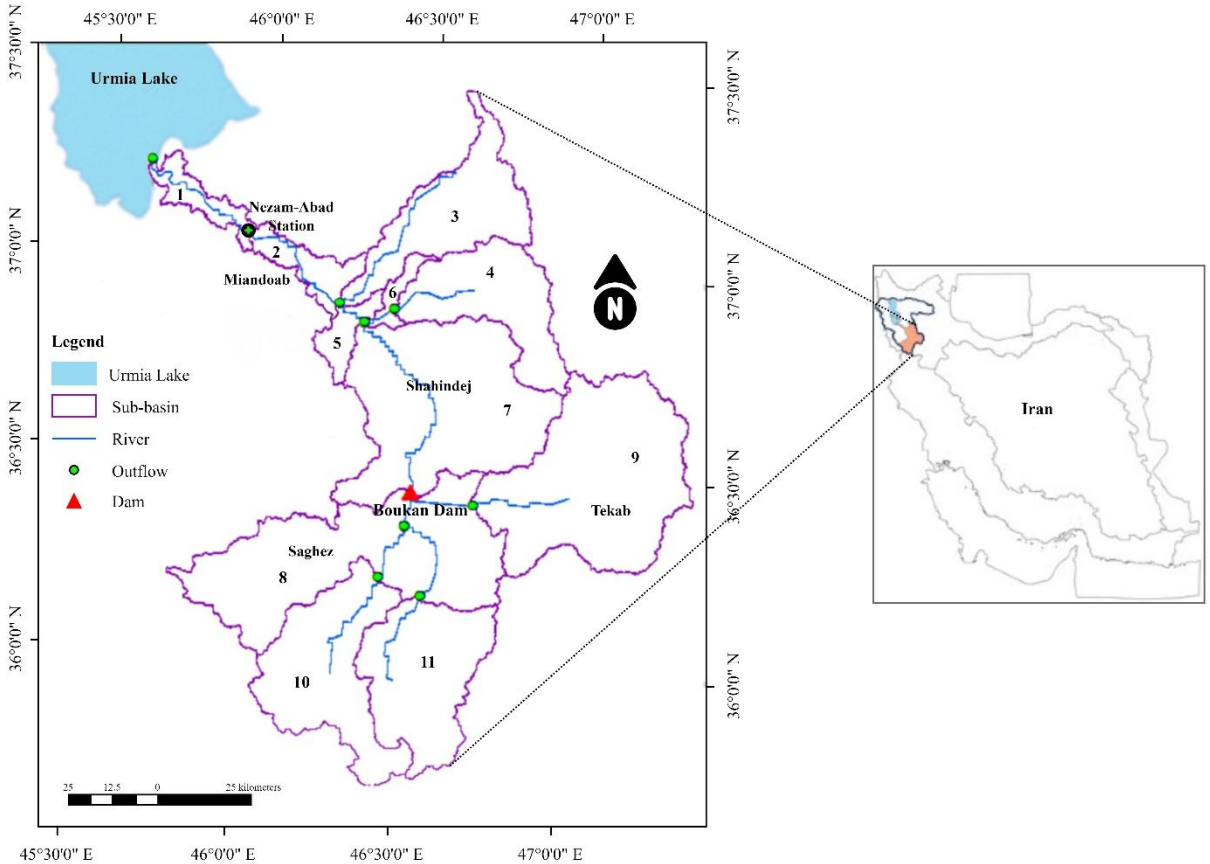

Fig. 1- Zarrinehrud river basin location in Iran and its sub-basins

شکل ۱- موقعیت حوضه رودخانه زرینه‌رود در ایران و زیرحوضه‌های آن (Ashrafi et al., 2022)

از ویژگی‌های دیگر این مدل مؤثر بودن آن از نظر محاسباتی است، به گونه‌ای‌که توسط این مدل، شبیه‌سازی یک حوضه بزرگ یا اجرای سناریوهای مدیریتی مختلف بدون سرمایه‌گذاری و صرف زمان و هزینه زیاد انجام می‌شود (Neitsch et al., 2011).

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT، از اطلاعات آن در مدل تخصیص بهینه MODSIM استفاده می‌شود. مدل MODSIM یک مدل عرضه و تقاضای منابع آب است که در سال ۱۹۷۰ در دانشگاه ایالتی کلرادو ساخته شد و برای شبیه‌سازی عرضه بهینه آب به‌منظور بهره‌برداری مناسب از حوضه‌های آبریز رودخانه‌ای استفاده می‌شود. این مدل از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌کند که هم‌زمان آب را بر اساس جنبه‌های اصلی سامانه منابع آب (مثلاً، ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولوژیکی) اختصاص می‌دهد. در این رابطه، تحقیقات متعددی وجود دارند که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی، سامانه‌های پیچیده حوضه رودخانه را شبیه‌سازی کرده‌اند. پس از ساخت مدل MODSIM، سناریوهای تغییر اقلیم و سناریوهای عرضه و تقاضای آب تعریف می‌شوند. سپس، مجموعه تمام سناریوهای تغییر اقلیم- عرضه و تقاضای آب در مدل MODSIM اجرا می‌شوند. در گام بعد، معیار تاب‌آوری برای هرکدام از سناریوهای مذکور ارزیابی می‌شود. لازم به ذکر است سناریوهای عرضه و تقاضای آب شامل پروژه‌های مهم از جمله انتقال آب و برخی گزینه‌های کاهش تقاضای آب کشاورزی در حوضه مورد مطالعه هستند. موارد دیگری همچون سیاست بهره‌برداری از سد، تخصیص آب به نیازهای آبی مختلف (بخش‌های شهری و صنعتی) با درنظر گرفتن اولویت‌ها و در نهایت مدیریت عرضه و تقاضا، در تعریف سناریوهای مذکور استفاده می‌شوند. جزئیات سناریوهای مورد استفاده در این مقاله به منظور بهبود وضعیت تاب‌آوری محدوده مورد مطالعه در پیوست (۱) ارائه شده است. برای دستیابی به اطلاعات بیشتر درباره ساخت مدل‌های SWAT و MODSIM و همچنین سناریوهای عرضه و تقاضای آب و تغییر اقلیم، به Behboudian (2021)، Behboudian and Kerachian (2021)، Pourmoghim et al. (2022) و Ashrafi et al. (2022) مراجعه شود.

۳-۲- تحلیل شبکه اجتماعی و تعیین ساختار سازمانی گرودارن

در فرایند تحلیل گرودارن (SA[۱۳])، گرودارن کلیدی و شیوه طبقه‌بندی آنها مشخص می‌شوند. سپس، قدرت و منافع گرودارن تعیین می‌شود. قدرت گرودارن با میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آنها ارتباط مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر، هرچه تأثیرگذاری گرودارن بیشتر از تأثیرپذیری آنها باشد، قدرت‌شان نیز بیشتر خواهد بود. در این مقاله، به‌منظور تعیین میزان کمّیِ قدرت و منافع هر کدام از گرودارن، از میانگین حسابی قدرت و منافع درنظر گرفته شده توسط همه گرودارن استفاده می‌شود (برای مطالعه بیشتر درباره فرایند SA، به مقالات Muchangos et al. (2017) و Barari et al. (2016) مراجعه شود). در گام بعد، ارزیابی شبکه اجتماعی انجام می‌شود. در این ارزیابی، از هر کدام از گرودارن خواسته می‌شود تا تمامی نهادهایی را که با آنها ارتباط سازمانی یا رسمی دارند، مشخص کند و در ادامه شدت و نوع ارتباط را تعیین کند. پس از انجام مصاحبه‌ها یا تکمیل پرسش‌نامه‌ها و جمع‌آوری اطلاعات پایه برای ارزیابی شبکه‌های اجتماعی، تمامی داده‌های کمّی به ماتریس تبدیل می‌شوند تا مورد تحلیل قرار گیرند. معمولاً برای ارزیابی شبکه‌های اجتماعی، از شاخص‌های معروف همچون مرکزیت درجه ورودی[۱۴]، مرکزیت درجه خروجی[۱۵]، مرکزیت بینابینی[۱۶] و مرکزیت بتا[۱۷] استفاده می‌شود. در ادبیات شبکه‌های اجتماعی، مرکزیت درجه ورودی نشانگر نقش کانونی رأس (گرودار) در شبکه و مرکزیت درجه خروجی بیانگر دسترسی بهتر آن رأس و ارتباطات قوی‌تر آن است. همچنین، رأسی که مرکزیت درجه بینابینی بالاتری دارد، می‌تواند نقش واسطه‌ای قوی‌تری در شبکه داشته باشد. معیار بعدی مرکزیت بتا است که در آن، مرکزیت هر فرد تابع اتصالات کسانی است که وی با آنها در ارتباط است. در این معیار، یک پارامتر تعریف می‌شود. این پارامتر می‌سنجد که مرکزیت یک فرد تا چه حد به مرکزیت افرادی بستگی دارد که وی با آنها در ارتباط است. در این مقاله از بسته نرم‌افزاری UCINET برای تحلیل شبکه اجتماعی گرودارن استفاده می‌شود. برای اطلاعات بیشتر درباره معیارهای مذکور به Ahmadi (2017) مراجعه شود. در گام بعد، جایگاه سازمانی گرودارن تعیین می‌شود که به این منظور، از ULRNC[۱۸](2015) (گزارش شناسایی، تحلیل و دسته‌بندی مجموعهٔ ذینفعان) استفاده می‌شود.

۴-۲- استفاده از مفهوم بازی پیشرو- پیرو در تعیین سناریوی برتر عرضه و تقاضای آب

پس از تعیین گرودارن اصلی و تعیین قدرت و جایگاه سازمانی آنها، یک روش مناسب تصمیم‌گیری اتخاذ می‌شود تا سناریوی برتر برای بهبود وضعیت تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب مشخص شود. معمولاً برای ارزیابی سناریوهای مدیریتی در محدوده مورد مطالعه، هر کدام از گرودارن، مطلوبیت‌هایی (معیارهایی) را درنظر می‌گیرند. گرودارن سطح اول (پیشروها) بر اساس عکس‌العمل پیروها به سناریوهای پیشنهادی آنها، انتخاب سناریوی نهایی را انجام می‌دهند. این انتخاب می‌تواند بر اساس معیارهایی مانند بودجه مورد نیاز، تاب‌آوری سیستم

و عدالت اجتماعی انجام گیرد. به‌عبارت دیگر، سناریوهای برتر پیشروها و پیروها به هم وابسته‌اند و بسته به سناریویی که پیشروها انتخاب می‌کنند، سناریوهای برتر پیروان نیز تعیین می‌شوند. در تصمیم‌گیری‌هایی که جایگاه و تراز سازمانی گرودارن یکسان نیست و تصمیم‌گیری‌ها به صورت سلسله مراتبی اتخاذ می‌شود، استفاده از بازی پیشرو- پیرو منطقی‌تر و نزدیکتر به واقعیت به نظر می‌رسد. این روش در Motlaghzadeh et al. (2020) و Behboudian et al. (2021) نیز استفاده شده است. در این مقاله، با توجه به اینکه گرودارن در سه سطح قرار گرفته‌اند و تصمیم‌گیری‌ها به صورت متوالی انجام می‌شود، از بازی پیشرو- پیرو در تصمیم‌گیری چندعامله-چندمعیاره استفاده می‌شود.

در مقاله حاضر، به ازای هر سناریوی پیشرو، پیروها با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره، سناریوهای برتر خود را تعیین می‌کنند و آن سناریوهای منتخب را به پیشرو گزارش می‌کنند. پیشرو بر اساس مطلوبیت‌های خود، سناریوهای اعلام شده به پیروان را ارزیابی می‌کند. این فرایند برای تمامی سناریوهای پیشرو انجام می‌شود و در نهایت، سناریوی برتر پیشرو و به تبع آن سناریوی برتر پیروها انتخاب می‌شود. در صورتی‌که چندین پیشرو در مسئله تصمیم‌گیری وجود داشته باشند، روند بالا تکرار می‌شود. در این حالت، ارزیابی چندمعیاره سناریوهای اعلام شده از جانب پیشروها پیچیده‌تر خواهد بود. از این‌رو، پیشروها نیز از رویکرد استنتاج شهودی استفاده می‌کنند. روند تعیین سناریوی برتر به این ترتیب است که گرودارن تراز پایین‌تر بر اساس سناریوهای اعلام شده از بالا، سناریوهای برتر خود را با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره استنتاج شهودی تعیین می‌کنند و آن سناریوهای منتخب را به پیشرو اعلام می کنند. پیشروها فرایند بالا را برای تمامی سناریوهای خود تکرار می کنند و در نهایت، بر اساس معیارهای خود، سناریوهای اعلام شده به پیروان را ارزیابی و رتبه‌بندی می‌کنند. بر این اساس، سناریوی برتر پیشروها و پیروها انتخاب می‌شود (شکل ۲). برای جزئیات بیشتر درباره این بازی به Behboudian et al. (2021a) مراجعه شود. در این بخش، افراد، سازمان‌ها یا گرودارانی که در تصمیم‌گیری برای مسئله موردنظر نقش اساسی ایفا می‌کنند، تعیین می‌شوند. این بازیکنان دارای اثربخشی زیادی در شرایط تصمیم‌گیری واقعی هستند و هر مطالعه‌ای بدون در نظرگیری نقش آن‌ها ناقص خواهد بود. هر مسأله تصمیم‌گیری، تصمیم‌گیرندگان یا بازیکنان خاص خودش را دارد. برای تعیین نقش گرودارن می‌توان از چارت‌های سازمانی و پرسش‌نامه استفاده کرد.

پس از شناسایی گرودارن، باید توالی حرکت بازیکنان و نوع حرکت آنان مشخص شود. بسته به جایگاه گرودارن، حرکت در این مقاله از پیشنهاد یک سناریوی مدیریتی تا تصویب یا عدم تصویب سناریو و تخصیص یا عدم تخصیص بودجه به اجرای آن سناریو می‌تواند متفاوت باشد. بازیکنانی که یک نوع حرکت را در یک زمان انجام می‌دهند، در یک سطح قرار می‌گیرند و در آن سطح، تصمیم‌گیری به‌صورت گروهی انجام می‌شود. پس از مشخص شدن نوع حرکت گرودارن (مثلاً تصویب یا عدم تصویب یک سناریو) و ترتیب حرکت‌های آنها، می‌توان این اطلاعات را در قالب یک بازی پیشرو- پیرو تعریف کرد.

با توجه به نوع حرکت گرودارن و توالی حرکت آنها، ممکن است در برخی از سطوحِ تصمیم‌گیری، بیش از یک گرودار وجود داشته باشد. همان‌گونه که در تصمیم‌گیری‌های روزمره نیز مشهود است، اثرگذاری و قدرت گرودارن مختلف در تصمیم‌گیری گروهی متفاوت است. بنابراین، لازم است وزن‌های تصمیم‌گیرندگان در آن سطح مشخص شوند و در تجمیع نظرات آن‌ها استفاده شوند. برای به‌دست آوردن وزن گرودارن می‌توان از روش‌هایی مثل تحلیل شبکه اجتماعی استفاده کرد.

هر کدام از گرودارن برای ارزیابی سناریوها به معیارهایی نیاز دارند که بتوانند با بررسی آن‌ها، تفاوت دیدگاه‌های خود را درباره سناریوهای مختلف متمایز کنند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، معیارها می‌توانند به دو دسته معیارهای کیفی و کمّی تقسیم شوند. در این گام، معیارهایی که هر یک از گرودارن مایل به ارزیابی سناریوها با استفاده از آن‌ها هستند، انتخاب می‌شوند. همان‌طور که تفاوت دیدگاه‌های گرودارن می‌تواند باعث شود که معیارهای ارزیابی آنان نیز تفاوت داشته باشند، وزن یا اهمیت معیارها نیز می‌تواند با یکدیگر تفاوت داشته باشد. برای تعیین اهمیت نسبی معیارهای ارزیابی گرودارن و وزن نسبی آن‌ها، می‌توان از مطالعه نقش سازمانی گرودارن و مطلوبیت‌هایشان استفاده کرد و در این مسیر، از پرسش‌نامه کمک گرفت. در ادامه، می‌توان از روش‌های مختلفی همچون روش مقایسه زوجی[۱۹] استفاده کرد. گام اصلی این روش، مقایسه زوجی دو معیار است به گونه‌ای‌که از تصمیم گیرنده خواسته می‌شود اظهار کند که آیا بین این دو معیار بی‌تفاوت است یا اینکه ترجیحاتی مانند ضعیف، سخت‌گیرانه، قوی یا بسیار قوی نسبت به برخی از آنها دارد. لازم به ذکر است که برای تخمین وزن‌های نسبی با استفاده از روش مقایسه زوجی، اولویت معیارها در مقایسه با یکدیگر در قالب ماتریس مقایسه زوجی تعیین می‌شود. پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، وزن نسبی معیارها را می‌توان با استفاده از روش بردار ویژه و روش‌های تـقریبی (مثلاً میانگین حسابی) محاسبه

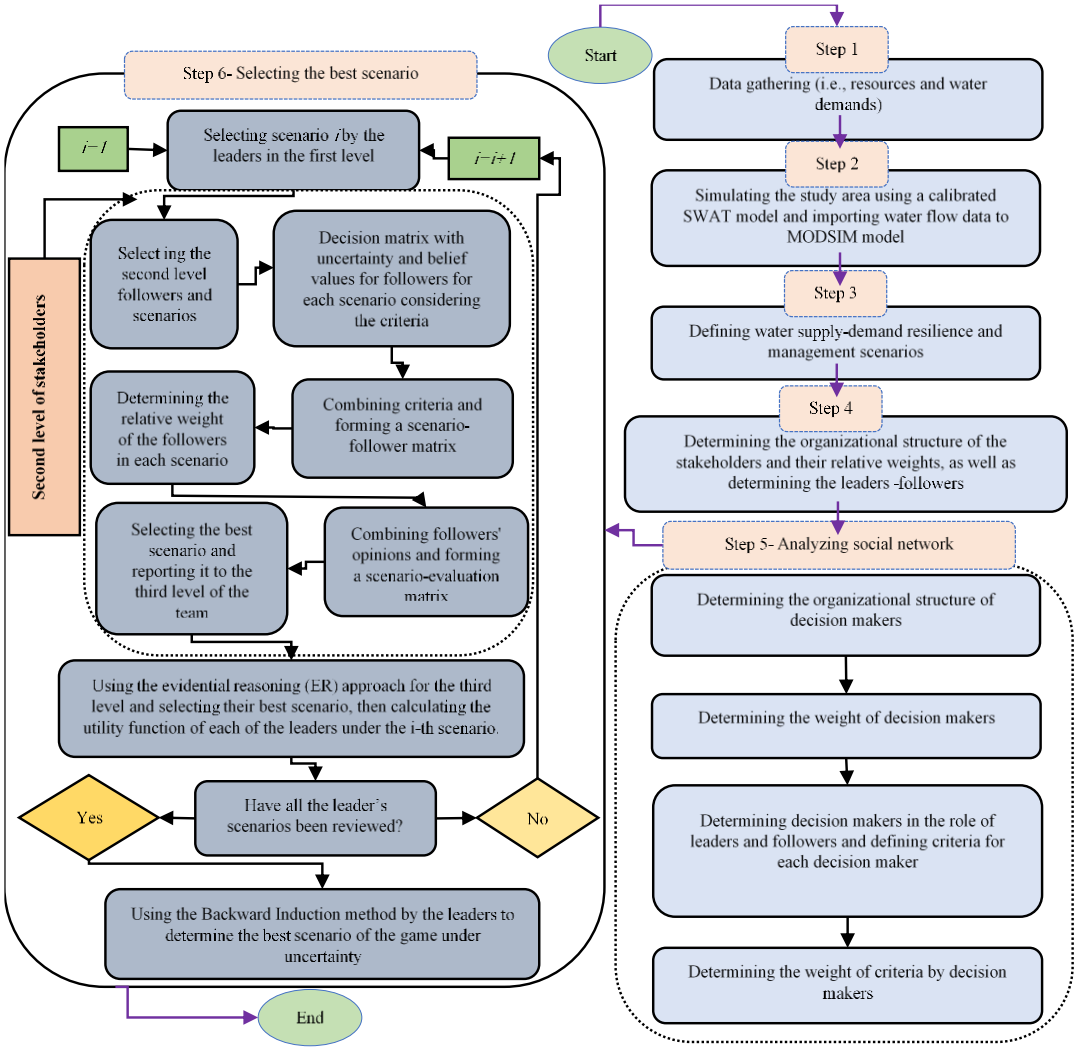

Fig. 2- Determining the best scenario of the stakeholders using group decision-making method based on the leader-follower game

شکل ۲- تعیین سناریوی برتر گرودارن با تصمیم‌گیری گروهی مبتنی بر بازی پیشرو- پیرو

کرد. در روش بردار ویژه، ماتریس $A - \lambda I$ تشکیل می‌شود که در این ماتریس، A ماتریس مقایسه زوجی، λ بردار ویژه و I ماتریس همانی است. پس از تشکیل ماتریس بالا، دِترمینان آن محاسبه می‌شود و مساوی صفر قرار می‌گیرد. با انتخاب λ_{max}، معادله ماتریسی $A - \lambda_{max} I = 0$ حل می‌شود و وزن‌های نسبی به‌دست می‌آیند.

در روش میانگین حسابی، هر عنصر در ماتریس مقایسه زوجی به جمع ستون خود تقسیم می‌شود تا ماتریس مقایسه زوجی نرمال شود. مقدار متوسط (میانگین) عناصر در هر سطر از ماتریس نرمال شده به‌عنوان وزن نسبی آن عنصر درنظر گرفته می‌شود (Saaty, 1980). در این مقاله، وزن‌دهی به معیارها مبتنی بر روش مقایسهٔ زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام شده است.

در گام بعد، درجه‌های باور با استفاده از رویکرد استنتاج شهودی تجمیع می‌شوند. برای انجام این کار، درجه‌های باور محاسبه شده در مراحل قبل برای معیارهای مختلف ($\beta_{n,i}$) (n شمارنده کلاس‌های ارزیابی و i شمارنده معیار است) تجمیع می‌شوند و برای هر سطح از تصمیم‌گیرندگان یک مجموعه درجه ارزیابی نهایی (β_n) برای هر سناریو به‌دست می‌آید. جزییات مربوط به این رویکرد به همراه روابط ریاضی آن در Behboudian (2021) ارائه شده است.

۲-۴-۱- یافتن سناریوی مناسب

در این بخش، پس از محاسبه درجه‌های باور معیارهای گرودارن در گام قبلی، روش استقرای بازگشتی[۲۰] به کار گرفته می‌شود تا سناریوی

بهینه گرودارن تعیین شود. این روش یک بازی[۲۱] کامل را به چند بازی فرعی[۲۲] تقسیم می‌کند و با یک ترتیب مشخص، اقدام به حل بازی کامل می‌کند. با توجه به اینکه در مقاله حاضر، گرودارن در سطوح مختلفی وجود دارند و همچنین روش حل استقرای بازگشتی به‌صورت سلسله‌مراتبی است، بنابراین، می‌توان از مزیت‌های این روش در حل بازی کامل و تعیین سناریوی بهینه استفاده کرد. نمونه‌ای از فرآیند انتخاب سناریوی برتر برای یک بازی دو سطحی در پیوست (۱) ارائه شده است.

۲-۵- بازی پیشرو- پیرو مبتنی بر رویکرد استنتاج شهودی

در این مقاله، به منظور ارزیابی سناریوهای تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب، پنج معیار اصلی اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، 4R (Robustness-Resourcefulness-Redundancy-Rapidity) و شاخص محیط‌زیستی در کنار هزینه اجرای سناریوها درنظر گرفته شدند. جزئیات بیشتر برای محاسبه معیارهای مذکور در پیوست (۱) و Behboudian and Kerachian (2021) ارائه شده‌اند. در ادامه، برای بهبود وضعیت محدوده مطالعاتی، از سناریوهای عرضه و تقاضای آب به منظور بهبود تاب‌آوری سامانه استفاده می‌شود. انتخاب سناریوی مدیریتی مناسب، صرفاً به تاب‌آوری حوضه مربوط نمی‌شود و معیارهای دیگری همچون هزینه نیز باید لحاظ شوند. از طرف دیگر، در یک حوضهٔ آبریز، گرودارن مختلفی وجود دارند که هرکدام مطلوبیت‌های خاص خودشان را دارند. از این‌رو، با توجه به اینکه گرودارن لزوماً در یک سطح قرار نمی‌گیرند و دارای جایگاه سازمانی متفاوتی هستند، این مسئله نیز به‌عنوان یک موضوع مهم دیگر مطرح می‌شود. بنابراین، لازم است مسئله با درنظرگیری معیارهای مختلف در کنار تاب‌آوری درنظر گرفته شوند و همچنین، جایگاه سازمانی گرودارن و قدرت تصمیم‌گیری آنها در انتخاب سناریوی بهینه نقش داشته باشد. در این مقاله، استفاده از بازی پیشرو- پیرو برای انتخاب سناریوی برتر در دستور کار قرار گرفته، برای تلفیق معیارهای مختلف و مطلوبیت‌های گرودارن از رویکرد استنتاج شهودی در بازی پیشرو- پیرو استفاده می‌شود. لذا ارزش (Payoff) سناریوی برتر در فرایند تصمیم‌گیری چندعامله-چندمعیاره مبتنی بر معیارهایی همچون تاب‌آوری در برابر خشکسالی و هزینه اجرایی سناریو تعیین می‌شود. لازم به ذکر است تعامل بین گرودارن در سطوح افقی به صورت گروهی و در سطوح قائم به صورت بازی پیشرو- پیرو بوده است. به عنوان نمونه، اگر در سطح دوم، تصمیم‌گیری دارای ۶ گرودار باشد، در این سطح، از رویکرد استنتاج شهودی استفاده شده، سناریوها رتبه‌بندی می‌شوند و ارزش هرکدام در این سطح تعیین می‌شود. اگر یک بازی دارای سه سطح تصمیم‌گیری باشد، برای تعیین سناریوی برتر از بازی پیشرو پیرو بین سطوح مختلف تصمیم‌گیری استفاده می‌شود، به گونه‌ای‌که سطح اول به عنوان پیشرو و سطوح بعدی به عنوان پیرو انتخاب می‌شود. همچنین، سطح دوم پیشروی سطح سوم است. در نهایت سناریویی انتخاب می‌شود که ارزش آن در سطح یک بیشترین مقدار باشد.

در یک تصمیم‌گیری چندمعیاره- چند عامله با رویکرد بازی پیشرو- پیرو، علاوه بـر تعریف معیارهای مناسب بـرای استفاده در فرایند تصمیم‌گیری، لازم است گرودارن مختلف در نقش پیشرو و پیرو نیز مشخص شوند. در این مقاله، فرایند تصمیم‌گیری به شکلی است که ابتدا راهکارها توسط کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه مطرح می‌شوند. سپس، راهکارهای ارائه شده توسط هیأت وزرا بررسی و در صورت مناسب بودن تصویب می‌شوند. در گام آخر، راهکارهای تصویب شده توسط هیئت وزرا به سازمان برنامه و بودجه تحویل داده می‌شوند. این سازمان بر پایه مطلوبیت‌هایی که دارد، ممکن است به سناریوهای دریافتی، بودجه کافی تخصیص بدهد یا ندهد. بنابراین، فرایند تعریف یک پروژه تا تأیید آن برای تخصیص بودجه در سه گام کلی انجام می‌شود (ULRNC, 2018). در این مقاله، از این رویکرد استفاده می‌شود و یک فرایند تصمیم‌گیری سه‌سطحی مدنظر قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، ستاد احیای دریاچه ارومیه (ULRNC) به‌عنوان پیشرو در سطح اول جای می‌گیرد. البته، سازمان حفاظت محیط‌زیست بازوی مشورتی این ستاد در سطح اول درنظر گرفته شده است. در گام بعد، هیئت وزرا شامل وزارت نیرو (ME[۲۳])، وزارت جهاد کشاورزی (MAJ[۲۴])، وزارت امور اقتصاد و دارایی (MEAF[۲۵])، وزارت بهداشت (MHME[۲۶])، وزارت صنعت، معدن و تجارت (MIM[۲۷]) و وزارت کشور (MI[۲۸]) به‌عنوان گرودارن سطح دوم انتخاب می‌شوند. در نهایت، سازمان برنامه و بودجه (PBO[۲۹]) و نمایندگان مجلس (MP[۳۰]) نیز به‌عنوان گرودارن سطح سوم انتخاب می‌شوند.

تا اینجا، معیارهای تصمیم‌گیری و گرودارن موجود در سطوح مختلف تعریف شدند. در این گام، وزن معیارها از دید گرودارن مختلف در هر سطح تصمیم‌گیری و وزن نسبی گرودارن هم‌سطح تعیین می‌شوند. برای تعیین وزن تصمیم‌گیرندگان از نتایج تحلیل شبکه اجتماعی استفاده می‌شود. در این مقاله، شاخص‌های مرکزیت بتا، مرکزیت بینابینی، درجه ورودی و درجه خروجی گرودارن موجود در یک سطح تصمیم‌گیری از تحلیل شبکه اجتماعی برای حوضه آبریز زرینه‌رود استخراج می‌شوند. پس از نرمال‌سازی شاخص‌های مذکور، با استفاده از روش OWA[۳۱]، وزن نسبی آنها مشخص می‌شود و چهار شاخص نرمال شده با هم تلفیق می‌شوند تا در نهایت وزن‌های گرودارن به دست آید. برای استفاده از روش OWA، باید شاخص‌ها رتبه‌بندی

شوند. پس از تعیین رتبه شاخص‌ها، از رابطه زیر برای محاسبه وزن‌های نسبی آنها استفاده می‌شود (Behboudian et al., 2021c):

$$w_n = Q\left(\frac{j}{n}\right) - Q\left(\frac{j-1}{n}\right), \quad j = 1,2,\dots,n \qquad (۱)$$

$$Q(r) = r^{\alpha} \qquad (۲)$$

که در آن، j نشان‌دهنده رتبه شاخص‌ها، n تعداد آنها، w_n وزن شاخص‌ها و Q یک کمّیت‌سنج است. همچنین، α درجه خوش‌بینی است که ریسک‌پذیر یا ریسک‌گریز بودن را نشان می‌دهد و معمولاً توسط کاربر تعیین می‌شود. با استفاده از رابطه‌های بالا، وزن گرودارن هم‌سطح تعیین می‌شوند در ادامه، وزن‌های نسبی معیارهای ارزیابی نیز باید از دید تمامی گرودارن موجود در فرایند تصمیم‌گیری تعیین شوند.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

در این مقاله، پس از انتخاب حوضهٔ آبریز زرینه‌رود به عنوان محدوده مطالعاتی، به کارگیری مدل شبیه‌سازی SWAT در دستور کار قرار گرفت. برای همین منظور، از نتایج مدل Emami (2018) استفاده شد. در این مدل، برای نشان دادن تغییرات مکانی حوضه آبریز زرینه‌رود، کل محدوده به ۱۱ زیرحوضه تقسیم شد که در شکل ۱ قابل مشاهده است. همچنین، زیرحوضه‌ها به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (Hydrologic Response Unit) تقسیم شدند که این واحدها با در نظرگیری کاربری اراضی، کاربری خاک و شیب زمین به دست آمده‌اند.

دورهٔ زمانی اجرای مدل بین سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۱۵ میلادی بوده است. لازم به ذکر است برای ساخت مدل، سری زمانی روزانه داده‌های اقلیمی شامل دمای کمینه و بیشینه و همچنین بارش مورد نیاز هستند. این اطلاعات از شش ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه آبریز زرینه‌رود و از سازمان هواشناسی ایران دریافت شده است. جزییات بیشتر در رابطه با ساخت مدل در Emami (2018) و Emami and Koch (2019) موجود هستند. لازم به ذکر است، برای واسنجی مدل شبیه‌سازی SWAT، از الگوریتم Sequential Uncertainty Fitting- version 2 (SUFI-2) در مدل SWAT-CUP استفاده شده است. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترها در هر زیرحوضه به صورت سلسله مراتبی از آخرین ایستگاه اندازه‌گیری دبی جریان در زیرحوضهٔ بالادست به سمت خروجی حوضه آبریز زرینه‌رود انجام شده است. در گام بعد، سیاست بهره‌برداری از سد بوکان مد نظر قرار گرفت. به این منظور، منحنی فرمان متناسب با نتایج Gavahi et al. (2018) انتخاب شد و به مدل SWAT تعریف شد. در ادامه، پارامترهای مربوط به بهره‌برداری از سد بوکان انتخاب و تحلیل حساسیت آنها انجام شد. نتایج پارامترهای نهائی انتخاب شده برای سد بوکان و همچنین، خروجی مدل واسنجی‌شده مدل SWAT به ترتیب در جداول ۱ و ۲ و شکل ۳ قابل ملاحظه هستند. لازم به ذکر است دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل به ترتیب دوره‌های زمانی ۲۰۱۲–۱۹۹۸ و ۱۹۹۷–۱۹۹۱ بوده است.

Table 1- Final parameters for the SWAT calibrated model

جدول ۱- پارامترهای نهایی منتخب مدل واسنجی شده SWAT

Parameter	Final value	Parameter	Final value
RES_ESA (ha)	5013	IFLOD1R	11
RES_EVOL (10^4 m^3)	76200	IFLOD2R	11
RES_PSA (ha)	4574	NDTARGR	1
RES_PVOL(10^4 m^3)	65400	EVRSV	0.6
RES_VOL (10^4 m^3)	60000	STARG_FPS	1
IRESCO	2		

Table 2- Rule curve and constraints applied to the release time series of Bukan dam

جدول ۲- منحنی فرمان و محدودیت اعمال شده در خروجی سد بوکان

Rule Curve (Million cubic meters)	Month											
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	250	320	500	600	590	500	420	330	270	240	220	240
Maximum release	50	100	160	450	200	80	60	60	50	35	45	40
Minimum release	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

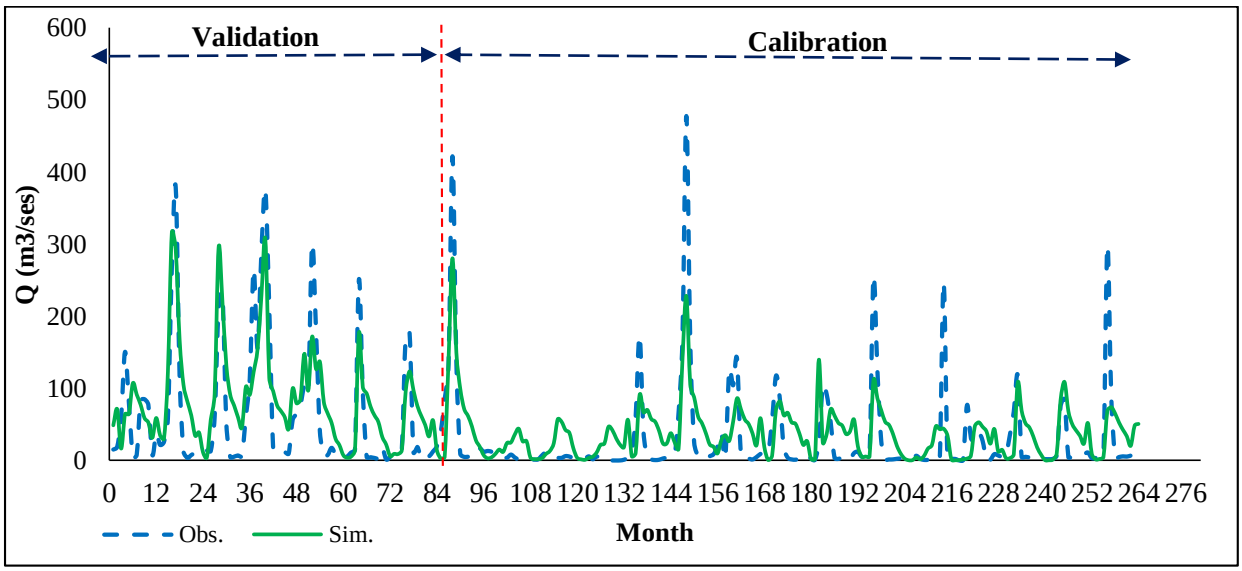

Fig. 3- Results of calibration and validation of the SWAT model at the outlet of Zarrinehrud River Basin (inflow to the Lake Urmia)

شکل ۳- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT در نقطهٔ خروجی حوضهٔ آبریز زرینه‌رود (معادل ورودی دریاچهٔ ارومیه)

منابع آب موجود در زیرحوضه‌های مختلف منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از مدل کالیبره شدهٔ SWAT شبیه‌سازی شدند. در گام بعد، جریان پیش‌بینی شده در زیرحوضه‌ها در مدل MODSIM برای ارزیابی سناریوهای عرضه و تقاضای آب استفاده شد. این مدل از الگوریتم بهینه‌سازی استفاده می‌کند و همزمان آب را بر اساس اولویت‌های تقاضای آب تخصیص می‌دهد. پس از وارد کردن میزان بارش روزانه، حداقل و حداکثر دمای هوا به مدل کالیبره شده SWAT، سری زمانی ورودی به سد بوکان و آب موجود در زیرحوضه‌های مختلف با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAT تعیین شدند. در ادامه و برای شبیه‌سازی سناریوهای عرضه و تقاضای آب، مدل MODSIM به کار گرفته شد. اولین و مهم‌ترین گام در استفاده از این مدل تعیین نیازهای ابی بخش‌های مختلف همچون نیاز شهری، صنعتی، کشاورزی و محیطزیستی است. نیازهای آب بخش شرب، صنعت و کشاورزی بر اساس نتایج Emami (2018) تعیین شدند. برای تعیین نیازهای محیطزیستی در محدودهٔ مورد مطالعه نیز از نتایج Yasi and Ashori (2017) استفاده شد. بدین ترتیب، داده‌های جریان آب ایستگاه‌های ساری قمیش و نظام‌آباد می‌توانند به ترتیب برای تخمین نیاز آب محیطزیستی رودخانه زرینه‌رود، به ترتیب در پایین دست سد بوکان و پیش از تخلیه در دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گیرند (جدول ۳). نمای شماتیک مدل‌سازی عرضه و تقاضای آب در حوضه رودخانه زرینه‌رود در شکل ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که در این شکل ۴ نشان داده شده است، Environment1 و Environment2 به ترتیب جریان محیط زیستی ایستگاه‌های ساری قمیش و نظام‌آباد را نشان می‌دهند، که حداقل نیاز محیطزیستی منطقه مورد مطالعه را تعیین می‌کنند. همچنین، Fishery نیاز محیطزیستی اضافه شده در بازه زمانی ۲۰۱۹–۲۰۴۹ بر پایه Emami (2018) است. علاوه بر این، Agriculture 1 با متوسط نیاز سالانه ۹۴۲ میلیون متر مکعب در پایین‌دست سد انحرافی نوروزلو، مهم‌ترین منطقه کشاورزی در محدودهٔ مورد مطالعه است. Agriculture 2 منطقه کشاورزی اضافه شدهٔ احتمالی در دوره زمانی آینده (۲۰۱۹ تا ۲۰۴۹) است.

Table 3- The environmental water demand of Zarrinehrud River based on FDC-shifting method (million cubic meters per month)

جدول ۳- نیاز آب محیطزیستی رودخانه زرینه‌رود بر اساس روش FDC-shifting (میلیون متر مکعب در ماه)

Station	Location	Month											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Sari Gamish	Downstream of the Boukan dam	21.15	14.95	39.93	50.95	106	71.78	9.1	5.75	6.1	4.14	3.28	12.3
Nezamabad	Upstream of the Lake Urmia	6.35	14.95	15.97	50.95	53	29.71	9.1	1.15	0.61	1.65	1.31	4.1

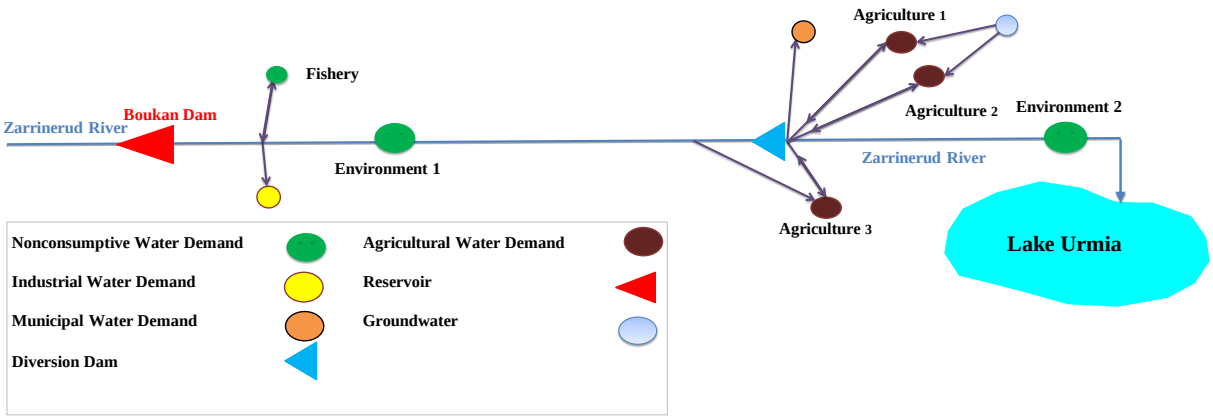

Fig. 4- Schematic view of water supply and demand points in the study area

شکل ۴- شکل شماتیک منابع عرضه و تقاضای آب در منطقه مورد مطالعه (Behboudian and Kerachian, 2021)

این زمین‌های کشاورزی از آب‌های سطحی و زیرزمینی با متوسط نیاز سالانه ۵۲ میلیون مترمکعب به عنوان منبع آبرسانی استفاده می‌کنند. سرانجام، Agriculture 3 نشان‌دهنده منطقه کشاورزی با متوسط نیاز سالانه ۲۷۴ میلیون مترمکعب است، که نیاز آبی آن عمدتاً از بالادست سد انحرافی نوروزلو تأمین می‌شود. همان‌طور که توسط Emami and Koch (2019) مورد بحث قرار گرفته است، اولویت‌های تأمین نیاز آب به ترتیب نزولی برابر نیاز شهری، صنعتی، محیط‌زیستی و کشاورزی است. فرض بر این است که نیاز آب شهری از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۴۹، ۵۰ درصد رشد خواهد داشت. لازم به ذکر است که در مدل شبیه‌سازی مبتنی بر MODSIM، جریان برگشتی کشاورزی به آب‌های زیرزمینی برابر با ۳۰ درصد درنظر گرفته شده است. همچنین، محدودیت‌های موجود در برداشت آب و درصد جریان برگشتی در MODSIM برپایه نتایج مدل کالیبره شده SWAT تنظیم شده است (Emami, 2018).

در ادامه، ۱۸ سناریوی عرضه و تقاضای آب تعریف شده در Behboudian and Kerachian (2021) که شامل پروژه‌های مهمی همچون انتقال آب از رودخانه زاب به دریاچه ارومیه و برخی گزینه‌های کاهش تقاضای آب کشاورزی در حوضه رودخانه زرینه‌رود هستند، تحلیل می‌شوند.

همان‌طور که در روش‌شناسی اشاره شد، به منظور ارزیابی سناریوهای تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب در این مقاله، از پنج معیار اصلی اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، 4R (Robustness-Resourcefulness-Redundancy-Rapidity) و شاخص محیط زیستی در کنار هزینه اجرای سناریوها استفاده شده است. مطابق با نتایج به‌دست آمده، وضعیت تاب‌آوری در حوضه آبریز زرینه‌رود در سناریوی مربوط به ادامه وضع موجود مناسب نیست. بنابراین، از سناریوهای عرضه و تقاضای آب استفاده شد تا مقدار تاب‌آوری بهبود یابد. در این مقاله، علاوه بر تعریف معیارهای مناسب برای استفاده در فرایند تصمیم‌گیری، گرودارن مختلف در نقش پیشرو و پیرو نیز مشخص شدند. بدین ترتیب، ستاد احیای دریاچه ارومیه (ULRNC) به‌عنوان پیشرو در سطح اول جای می‌گیرد. در گام بعد، هیأت وزرا شامل وزارت نیرو (ME)، وزارت جهاد کشاورزی (MAJ)، وزارت امور اقتصاد و دارایی (MEAF)، وزارت بهداشت (MHME)، وزارت صنعت، معدن و تجارت (MIMT) و وزارت کشور (MI) به‌عنوان گرودارن سطح دوم انتخاب شدند. در نهایت، سازمان برنامه و بودجه (PBO) و نمایندگان مجلس (MP) نیز به‌عنوان گرودارن سطح سوم انتخاب شدند.

برای تعیین وزن تصمیم‌گیرندگان از نتایج تحلیل شبکه اجتماعی استفاده شد و شاخص‌های مرکزیت بتا، مرکزیت بینابینی، درجه ورودی و درجه خروجی گرودارن موجود در یک سطح تصمیم‌گیری از تحلیل شبکه اجتماعی برای حوضه آبریز زرینه‌رود استخراج شدند. در گام بعد، با استفاده از روش OWA، وزن نسبی گرودارن مشخص شد و چهار شاخص نرمال شده با هم تلفیق شدند تا در نهایت، وزن‌های گرودارن به‌دست آید. در این مقاله، سطوح دوم و سوم تصمیم‌گیری دارای بیش از یک گرودار است که وزن نسبی تک‌تک آنها با استفاده از روش OWA تعیین شدند. نتایج محاسبات وزن‌های گرودارن سطوح دوم و سوم در جدول ۴ ارائه شده است. برای تعیین وزن‌های نسبی معیارها، از نظرات متخصّصان استفاده شد. متخصّصان سعی داشته‌اند وزن‌دهی معیارها را متناسب با وظیفه و مطلوبیت‌های گرودارن مختلف ارائه کنند. جزییات وزن‌های نسبی معیارها از دید گرودارن مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است برای تحلیل شبکهٔ اجتماعی

از پرسش‌نامه استفاده شد، که جزییات آن در پیوست (۱) قابل ملاحظه است.

همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، گرودارن سطح سوم، به هزینه اجرای سناریوها وزن قابل توجهی داده‌اند، تا نشان داده شود اجرای سناریوها تنها منوط به بالا بودن تاب‌آوری نیست. مورد دیگر این است که تقریباً تمام گرودارن به افزایش آب ورودی به دریاچه وزن نسبی داده‌اند. بنابراین، وزن‌های اختصاص داده شده، مناسب به نظر می‌رسند. لازم به ذکر است این گرودارن اصلی توسط ستاد احیای دریاچه ارومیه تعیین شده‌اند و نظرات گرودارن مربوط به هر ارگان با ارسال پرسشنامه یا مراجعه مستقیم به آنها دریافت و صحت‌سنجی شده‌اند.

پس از تعیین وزن‌های نسبی گرودارن و معیارهای تصمیم‌گیری، فرایند تصمیم‌گیری مبتنی بر تلفیق بازی پیشرو- پیرو و رویکرد استنتاج شهودی اعمال شد. برای انتخاب سناریوی برتر در فرایند بالا، از روش استقرای بازگشتی استفاده شد. با درنظر گرفتن ۱۸ سناریوی مدیریتی و دو گزینه تصویب یا عدم تصویب سناریو در سطح دوم و همچنین، دو گزینه تخصیص یا عدم تخصیص بودجه به سناریوها در سطح سوم، ۵۴ حالت مختلف در این فرایند تشکیل شدند. جزییات این فرایند در شکل ۵ قابل ملاحظه است.

پس از بررسی حالت‌های مختلف بازی و استفاده از روش استقرای بازگشتی، سناریوی چهار (S4) به‌عنوان سناریوی بهینه انتخاب شد. لازم به ذکر است در استفاده از رویکرد استنتاج شهودی در فرایند تصمیم‌گیری، همانند بخش‌های قبل، از پنج کلاس ارزیابی (H_1,H_2,H_3,H_4,H_5) استفاده شد و مقادیر ارزش کلاس‌ها در تخمین تاب‌آوری به‌ترتیب برابر صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ انتخاب شدند. از آنجا که تعداد سناریوهای مدیریتی تقریباً زیاد است و ارائه همه نتایج امکان‌پذیر نیست، در این مقاله، نتایج نهایی بازی به ازای ۱۸ سناریوی مدیریتی ارائه شده است. شکل ۶ نتایج مبتنی بر درجه باور سناریوهای عرضه و تقاضای آب را برای دوره‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ نشان می‌دهد. مطابق با این شکل‌ها، سناریوی با تاب‌آوری بیشتر وضعیت مطلوب‌تری دارد، اما، لزوماً این سناریوها توسط گرودارن سطوح دوم و سوم انتخاب نمی‌شوند.

Table 4- Relative weights of the second and third levels using the results of social network analysis and OWA method

جدول ۴- وزن‌های نسبی سطوح دوم و سوم با استفاده از نتایج تحلیل شبکه اجتماعی و روش OWA

Stakeholders of 2nd level	Relative weight	Stakeholders of 3rd level	Relative weight
Ministry of Energy (ME)	0.28	Plan and Budget Organization (PBO)	0.52
Ministry of Agriculture Jihad (MAJ)	0.28		
Ministry of Economic Affairs and Finance (MEAF)	0.07		
Ministry of Health and Medical Education (MHME)	0.05	Members of Parliament (MP)	0.48
Ministry of Industry, Mine and Trade (MIMT)	0.07		
Ministry of Interior (MI)	0.25		

Table 5- Relative weights of decision-making criteria at different levels of decision-making

جدول ۵- وزن‌های نسبی معیارهای تصمیم‌گیری از دید گرودارن سطوح مختلف تصمیم‌گیری

Criteria	Stakeholder								
	ULRNC	ME	MAJ	MEAF	MHME	MIMT	MI	PBO	MP
Reliability	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.07	0	0
Resilience	0.07	0.07	0.08	0.07	0.05	0.09	0.07	0	0
Vulnerability	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.06	0.07	0	0
4R	0.45	0.45	0.5	0.25	0.2	0.35	0.4	0.25	0.25
Ecological Index	0.19	0.34	0.29	0.09	0.59	0.19	0.19	0.05	0.15
Operational Cost	0.15	0	0	0.45	0	0.25	0.2	0.7	0.6

در جدول ۶ جزئیات محاسبات مربوط به سناریوهای منتخب ارائه شده است. مطابق با این جدول، ابتدا گرودارن سطح اول سناریوها مدیریتی مناسب را پیشنهاد می‌کنند. گرودارن سطح دوم بر اساس معیارهای خودشان و به‌صورت گروهی مطلوبیت نهایی خودشان را در سناریوهای مدیریتی پیشنهادی مشخص می‌کنند. سپس، مطلوبیت‌های به‌دست آمده در هر سناریو را با سناریوی پایه مقایسه می‌کنند و اگر مطلوبیت شان در یک سناریو بیشتر از مطلوبیت سناریوی پایه باشد، آن را تصویب می‌کنند. همین فرایند برای گرودارن سطح سوم نیز تکرار می‌شود و بر این اساس، بودجه به سناریوهایی که در آنها مطلوبیت گروهی گرودارن بیشتر از مطلوبیت سناریوی پایه باشد، تخصیص داده می‌شود. سناریوهایی که در سطح سوم تخصیص بودجه داده شده‌اند و همچنین، در سطح دوم تصویب شده‌اند به گرودارن سطح اول (پیشرو) ارائه می‌شوند. در گام آخر، مطلوبیت سطح اول برای سناریوهای گزارش شده از سطوح پایین‌تر محاسبه می‌شود و سناریویی که بیشترین مطلوبیت را در سطح اول داشته باشد، به‌عنوان سناریوی مدیریتی بهینه انتخاب می‌شود. در یک رویکرد کلی، گرودارن موجود در سطح دوم و سوم متناسب با معیارهای خودشان، سناریوهای پیشنهادی توسط سطح اول گرودارن را ارزیابی می‌کنند. سپس، مطلوبیت هرکدام از سناریوها در سطح دوم و سوم با سناریوی پایه مقایسه می‌شود. در صورتی که مطلوبیت یک سناریو در سطح دوم از سناریوی پایه بیشتر باشد، گرودارن موجود در این سطح، سناریوی پیشنهادی را تصویب می‌کنند. همچنین، اگر مطلوبیت سناریویی در سطح سوم بیشتر از مطلوبیت سناریوی پایه باشد، بودجه لازم برای اجرای آن سناریو در سطح سوم تخصیص داده می‌شود. در نهایت، سناریوهایی که بودجه لازم برای اجرای آنها در سطح سوم تخصیص داده شود و در سطح دوم برای اجرا تصویب شوند، به گرودارن سطح اول گزارش داده می‌شوند. در این سطح، گرودارن سناریوهای گزارش داده شده از سطوح پایین را بر مبنای معیارهای خودشان ارزیابی می‌کنند و سناریوی دارای بیشترین مطلوبیت را به‌عنوان بهترین سناریو انتخاب می‌کنند.

نتایج تصمیم‌گیری بالا نشان می‌دهد که سناریوی S4 به ارزش (تلفیق میزان تاب‌آوری در برابر خشکسالی و هزینه اجرایی سناریو) ۰/۷۲ به عنوان سناریوی برتر انتخاب می‌شود. طبق تعریف سناریوها، در این سناریو میزان نیاز کشاورزی باید تا انتهای سال ۲۰۲۱ به اندازه ۳۰ درصد کاهش یابد. یعنی میزان نیاز بخش کشاورزی که در سناریوی پایه حدود ۱۲۱۶ میلیون متر مکعب است، در سناریوی منتخب باید به ۸۵۱ میلیون متر مکعب برسد. با اجرای این سناریو، حدود ۷۵ درصد هدف نهایی ستاد احیای دریاچه ارومیه (کاهش ۴۰ درصدی نیاز آب بخش کشاورزی) محقق می‌شود و تاب‌آوری محدوده مطالعاتی افزایش پیدا می‌کند.

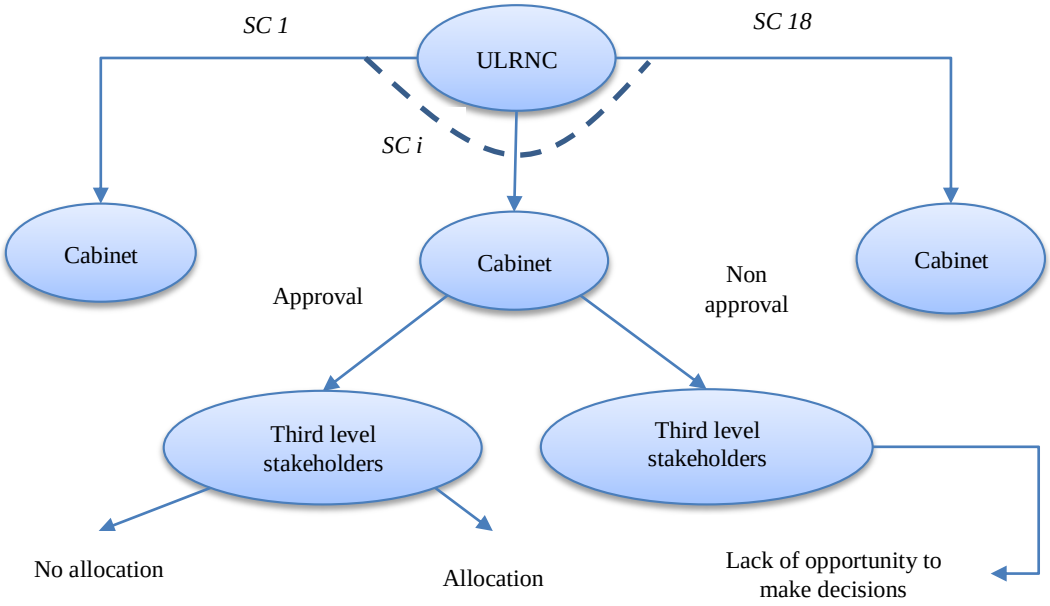

Fig. 5- The decision-making process regarding the approval of the management scenario and its budget allocation in the three-level game

شکل ۵- فرایند تصمیم‌گیری درباره تصویب سناریوی مدیریتی و تخصیص بودجه آن در بازی سه‌سطحی

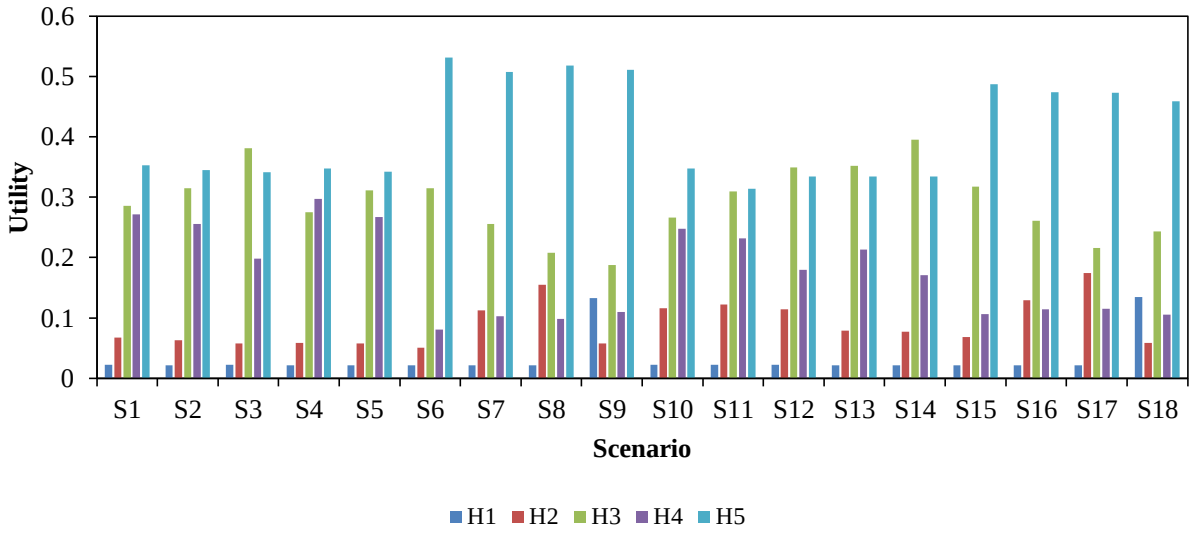

Fig. 6- Dergrees of belief calculated in the first level of decision-making for selected scenarios in the period 2020-2050

شکل ۶- مقادیر درجه‌های باور محاسبه شده در سطح اول تصمیم‌گیری برای سناریوهای منتخب در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰

Table 6- Details of the process of selecting the best management scenario for the period 2020-2050

جدول ۶- جزییات فرایند انتخاب سناریوی مدیریتی برتر برای دوره زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰

Scenario	Payoff in Level 1	Payoff in Level 2	Approval/non-approval	Payoff in Level 3	Allocation/non-allocation of budget	Select (1) / Unselect (0)
S1	0.72	0.72	Non approval	0.95	Allocation	0
S2	0.71	0.72	Non approval	0.95	Allocation	0
S3	0.69	0.71	Non approval	0.93	Allocation	0
S4	0.72	0.74	Approval	0.96	Allocation	1
S5	0.71	0.73	Approval	0.9	Allocation	1
S6	0.76	0.79	Approval	0.75	No allocation	0
S7	0.74	0.77	Approval	0.54	No allocation	0
S8	0.73	0.77	Approval	0.4	No allocation	0
S9	0.7	0.75	Approval	0.11	No allocation	0
S10	0.7	0.7	Non approval	0.95	Allocation	0
S11	0.67	0.67	Non approval	0.94	Allocation	0
S12	0.67	0.69	Non approval	0.89	Allocation	0
S13	0.69	0.7	Non approval	0.95	Allocation	0
S14	0.68	0.69	Non approval	0.85	No allocation	0
S15	0.74	0.77	Approval	0.71	No allocation	0
S16	0.72	0.75	Approval	0.49	No allocation	0
S17	0.71	0.75	Approval	0.32	No allocation	0
S18	0.67	0.72	Non approval	0.11	No allocation	0
Selected Scenario	S4 (Payoff=0.72)					

همچنین، در اجرای سناریوهای مختلف نیاز آب بخش‌های محیطزیست و صنعت ثابت و برابر ۵۳۳ و پنج میلیون متر مکعب باقی می‌ماند. نیاز آب بخش شرب نیز در بازه زمانی آینده ۵۰ درصد افزایش داده می‌شود و از ۱۶۲ میلیون متر مکعب در سال به ۲۴۳ میلیون متر مکعب در سال می‌رسد. جزییات نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. در حالت استفاده از اطلاعات بالا، فرایند تصمیم‌گیری چند عامله-

چندمعیاره بار دیگر بدون درنظر گرفتن بازی پیشرو- پیرو در دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ تکرار شد. در این روش تصمیم‌گیری، بازی پیشرو- پیرو درنظر گرفته نشده است و تصمیم‌گیری صرفاً در یک سطح و بدون درنظر گیری جایگاه سازمانی گرودارن انجام شده است (تصمیم‌گیری یک بار انجام می‌شود و سلسله مراتبی نیست). برای این حالت که تمامی گرودارن در یک سطح قرار می‌گیرند، وزن‌های نسبی آنها باید مشخص شود (جدول ۸). پس از محاسبه وزن‌های نسبی گرودارن، از رویکرد استنتاج شهودی استفاده شد و نتایج مبتنی بر درجه باور سناریوها به همراه رتبه‌بندی آنها مشخص شدند. شکل ۷ و جدول ۹ به‌ترتیب درجه‌های باور سناریوهای مدیریتی منتخب و رتبه‌بندی آنها را نشان می‌دهند.

Table 7- Water resources allocated to different water demand nodes in the baseline and the selected scenarios

جدول ۷- منابع آب تخصیص داده شده به بخش‌های مختلف نیاز آب در سناریوی پایه و سناریوی منتخب

Scenario	Allocated water (million m^3/year)			
	Municipal demand node	Industrial demand node	Environmental demand node	Agricultural demand node
Baseline scenario (S1)	162	5	533	1216
Selected scenario (S4)	243	5	533	851

Table 8- Relative weights calculated from social network results without considering the leader-follower game

جدول ۸- وزن‌های نسبی محاسبه شده از نتایج شبکه اجتماعی بدون درنظرگرفتن بازی پیشرو- پیرو

Stakeholder	Relative weight
Ministry of Industry, Mine and Trade (MIMT)	0.03
Ministry of Health and Medical Education (MHME)	0.01
Plan and Budget Organization (PBO)	0.12
Ministry of Economic Affairs and Finance (MEAF)	0.03
Ministry of Interior (MI)	0.16
Ministry of Energy (ME)	0.18
Ministry of Agriculture Jihad (MAJ)	0.18
Urmia Lake Restoration National Committee (ULRNC)	0.16
Members of Parliament (MP)	0.13

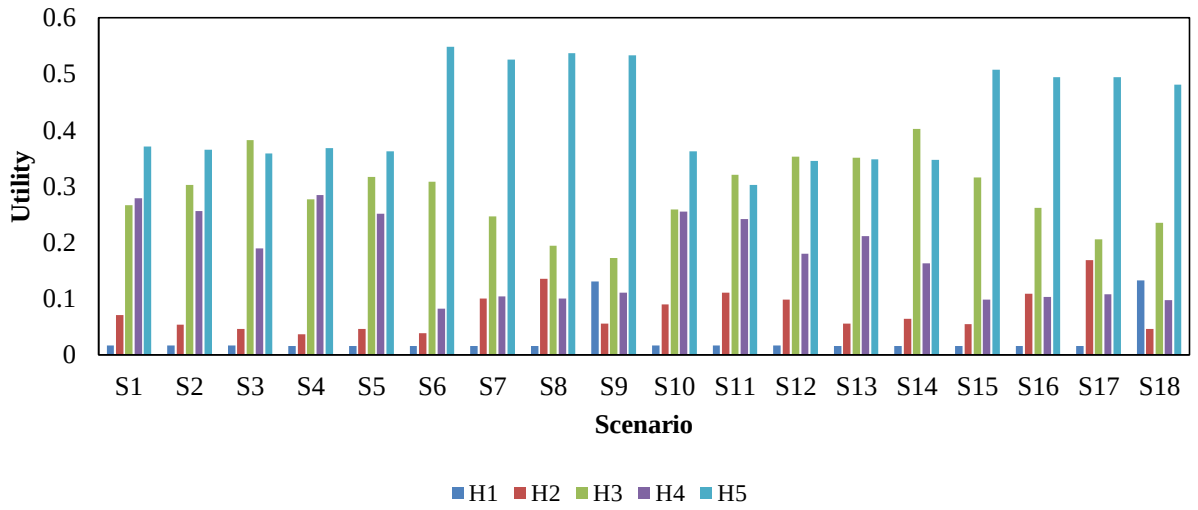

Fig. 7- Degrees of belief calculated for selected management scenarios in the period 2020-2050

شکل ۷- مقادیر درجه‌های باور محاسبه شده برای سناریوهای مدیریتی منتخب در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰

Table 9- Degrees of belief, rank and value of selected management scenarios in the period 2020-2050

جدول ۹- درجه‌های باور، رتبه و ارزش سناریوهای مدیریتی منتخب در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰

Scenario	Assessment Grades						Rank	Value
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	β_H		
S1	0.02	0.07	0.27	0.28	0.37	0	7	0.73
S2	0.02	0.05	0.3	0.26	0.36	0.01	8	0.72
S3	0.02	0.05	0.38	0.19	0.36	0.01	13	0.7
S4	0.02	0.04	0.28	0.28	0.37	0.02	5	0.73
S5	0.02	0.05	0.32	0.25	0.36	0.01	9	0.72
S6	0.01	0.04	0.31	0.08	0.55	0.01	1	0.78
S7	0.02	0.1	0.25	0.1	0.53	0.01	3	0.75
S8	0.02	0.13	0.19	0.1	0.54	0.02	4	0.75
S9	0.13	0.05	0.17	0.11	0.53	0	11	0.71
S10	0.02	0.09	0.26	0.25	0.36	0.02	12	0.71
S11	0.02	0.11	0.32	0.24	0.3	0.01	18	0.67
S12	0.02	0.1	0.35	0.18	0.34	0.01	17	0.68
S13	0.02	0.06	0.35	0.21	0.35	0.02	14	0.7
S14	0.02	0.06	0.4	0.16	0.35	0.01	15	0.69
S15	0.01	0.05	0.32	0.1	0.51	0.01	2	0.75
S16	0.02	0.11	0.26	0.1	0.49	0.02	6	0.73
S17	0.02	0.17	0.21	0.11	0.49	0.01	10	0.72
S18	0.13	0.05	0.23	0.1	0.48	0.01	16	0.68

همان‌طور که در شکل ۷ و جدول ۸ نشان داده شده است، در حالتی که تصمیم‌گیری در یک سطح انجام می‌شود، سناریوی S6 انتخاب می‌شود. این در حالی است که هزینه اجرای این سناریو به‌مراتب بیشتر از سناریوی بهینه قبلی (S4) است. اگرچه وضعیت تاب‌آوری در این سناریو بهتر از سناریوی بهینه قبلی است، اما تفاوت آنها چندان زیاد نیست و وضعیت تاب‌آوری سناریوی S4 نیز مناسب ارزیابی می‌شود. بنابراین، نتایج نشان داده‌اند که در استفاده از بازی پیشرو- پیرو، سناریوی منطقی‌تری انتخاب می‌شود، به گونه‌ای‌که سناریوی منتخب تاب‌آوری و هزینه مناسبی دارد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر، تاب‌آوری سناریوهای عرضه و تقاضای آب در حوضه آبریز زرینه‌رود مبتنی بر تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره ارزیابی شد. محدوده مطالعاتی انتخاب شده در این تحقیق حوضهٔ آبریز زرینه‌رود (یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز ارومیه) بود. با توجه به اهمیت این حوضه، بررسی تاب‌آوری این حوضه آبریز با درنظرگیری معیارهای گرودارن مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، معیار تاب‌آوری و هزینه اجرای سناریوهای مدیریت منابع آب با توجه به مقاله Behboudian and Kerachian (2021) محاسبه شدند. سپس، با درنظرگیری ۱۸ سناریوی عرضه و تقاضای آب و تحلیل تاب‌آوری آنها با تلفیق بازی پیشرو- پیرو و رویکرد استنتاج شهودی، سناریوی برتر انتخاب شد و با روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (بدون درنظر گرفتن گرودارن موجود در حوضه) مقایسه شد. این نوع ارزیابی تاب‌آوری سناریوها با دیدگاه تصمیم‌گیری چند عامله- چندمعیاره و مقایسه نتایج آن با روش‌های دیگر در این حوضه احتمالاً برای اولین بار انجام شده است. ارزیابی تاب‌آوری سناریوهای عرضه و تقاضای آب در سه سطح تصمیم‌گیری انجام شد. ابتدا، حوضه آبریز زرینه‌رود در مدل SWAT شبیه‌سازی و تخصیص بهینه آب با استفاده از مدل MODSIM انجام شد. سپس، گرودارن اصلی محدوده مطالعاتی تحلیل و در سه سطح کلی تقسیم‌بندی شدند. در گام بعد و در سطح اول تصمیم‌گیری، تاب‌آوری سناریوهای عرضه و تقاضای آب با درنظرگیری معیارهای مهم گرودارن این سطح و بازخورد گرودارن موجود در سطوح دیگر تصمیم‌گیری تحلیل شدند.

با ادامه این فرایند، سناریوی برتر توسط پیشروها تعیین شد و نتیجه آن با یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره که در آن معیارهای گرودارن، ترازهای سازمانی و قدرت آنها درنظر گرفته نشده است، مقایسه شد. بر این اساس، سناریوی چهارم انتخاب شد که ارزش این سناریو در سطح اول تصمیم‌گیری برابر ۰/۷۲ بود و همچنین توسط گرودارن

سطح دو (با ارزش ۰/۷۴) و سطح سه (با ارزش ۰/۹۶) به‌ترتیب تصویب و تخصیص بودجه داده شد. در سناریوی منتخب میزان نیاز کشاورزی ۳۰ درصد کاهش یافت و از ۱۲۱۶میلیون مترمکعب به ۸۵۱ میلیون مترمکعب رسید. این سناریوی منتخب در مقایسه با سناریوی ششم (با ارزش ۰/۷۶ در سطح اول تصمیم‌گیری) که در روش تصمیم‌گیری چندمعیاره بدون درنظرگیری گرودارن انتخاب شده است، ۲۱ درصد هزینه اجرای کمتری دارد. علی‌رغم اینکه در سناریوی ششم، میزان نیاز کشاورزی حدود ۴۰ درصد کاهش یافت و از ۱۲۱۶ میلیون متر مکعب به ۷۲۹ میلیون متر مکعب رسید (که مطابق با هدف نهائی ستاد احیای دریاچه ارومیه است)، اما نتایج نشان دادند که اختلاف ارزش سناریوی چهارم در مقایسه با سناریوی ششم در سطح اول کم (۰/۰۴) است. بنابراین، در استفاده از بازی پیشرو- پیرو، سناریوی منطقی‌تری انتخاب شده است، به گونه‌ای‌که سناریوی منتخب تاب‌آوری و هزینه مناسبی دارد. با دقت در نتایج این تحقیق مشخص می‌شود که تعامل گرودارن با توجه به جایگاه سازمانی آنها و درنظرگیری قدرت و اهمیت نسبی آنها تأثیر مهمی در انتخاب یک راهکار مناسب برای بهبود وضعیت تاب‌آوری در مقیاس حوضهٔ آبریز دارد. هر سازمان در جایگاه خود معیارهای مهم خود را می‌سنجد و بر اساس آن راهکار مناسب را انتخاب می‌کند. با این حال، راهکار نهایی معیارها و مطلوبیت‌های تمام گرودارن را درنظر می‌گیرد. اما تصمیم‌گیری در یک تراز سازمانی و بدون درنظرگیری نقش گرودارن کلیدی، ممکن است منجر به راهکاری شود که از دید تمام گرودارن یک راهکار بهینه نباشد. به عنوان مثال، سناریوی ششم در فرآیند تصمیم‌گیری دوم هزینه بیشتری دارد و نشان می‌دهد سازمان برنامه و بودجه نتوانسته است برترین سناریوی خود را انتخاب کند، هرچند در تصمیم‌گیری دور یک میز حضور داشته است. از این رو، نقش گرودارن و جایگاه سازمانی آنها در انتخاب یک راهکار کاربردی برای بهبود وضعیت یک حوضهٔ آبریز نقش مهمی ایفا می‌کند.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، علاوه بر تاب‌آوری سناریوهای مربوط به عرضه و تقاضای سامانه‌های منابع آب، تاب‌آوری بخش کشاورزی شامل تولید غذا، جذب کربن توسط محصولات کشاورزی و همچنین، متغیرهایی همچون رسوب و افت سطح آب زیرزمینی با جزییات بیشتر ارزیابی شود. از این‌رو، با اجرای راهکاری مختلف مدیریتی، می‌توان تاب‌آوری متناسب با این بخش را نیز ارزیابی کرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود علاوه بر معیار تاب‌آوری، معیارهای مرتبط با برد منابع آب (Carrying capacity of water resources) با درنظرگیری خدمات اکوسیستم هیدرولوژیکی بررسی و تحلیل شوند. در نهایت پیشنهاد می‌شود با بررسی معیارهایی همچون مدیریت ارتباط (Manging connectivity)، یادگیری و کسب تجربه (Encourage learning and experimentation)، مشارکت (Broaden participation) و حکمرانی چندمرکز (Promote polycentric governance) تعامل بین گرودارن بررسی و در صورت لزوم بهبود یابد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (Iran National Science Foundation: INSF) تحت قرارداد شماره 98014423 انجام شده است.

پی‌نوشت‌ها

1- Redundancy
2- Resourcefulness
3- Robustness
4- Rapidity
5- Evidential Reasoning Approach
6- Grade-based Combination Approach
7- Durability
8- Preference Programming Approach
9- Integrated Water Resources Optimization Model
10- Compromise Programming
11- Complex Proportional Assessment
12- Land Management
13- Stakeholder Analysis
14- In-degree Centrality
15- Out-degree Centrality
16- Betweenness Centrality
17- Beta Centrality
18- Urmia Lake Restoration National Committee
19- Pairwise Comparison
20- Backward Induction
21- Game
22- Sub-Game
23- Ministry of Energy
24- Ministry of Agriculture Jihad
25- Ministry of Economic Affairs and Finance
26- Ministry of Health and Medical Education
27- Ministry of Industry, Mine and Trade
28- Ministry of Interior
29- Plan and Budget Organization
30- Members of Parliament
31- Ordered Weighted Averaging Method

پیوست ۱

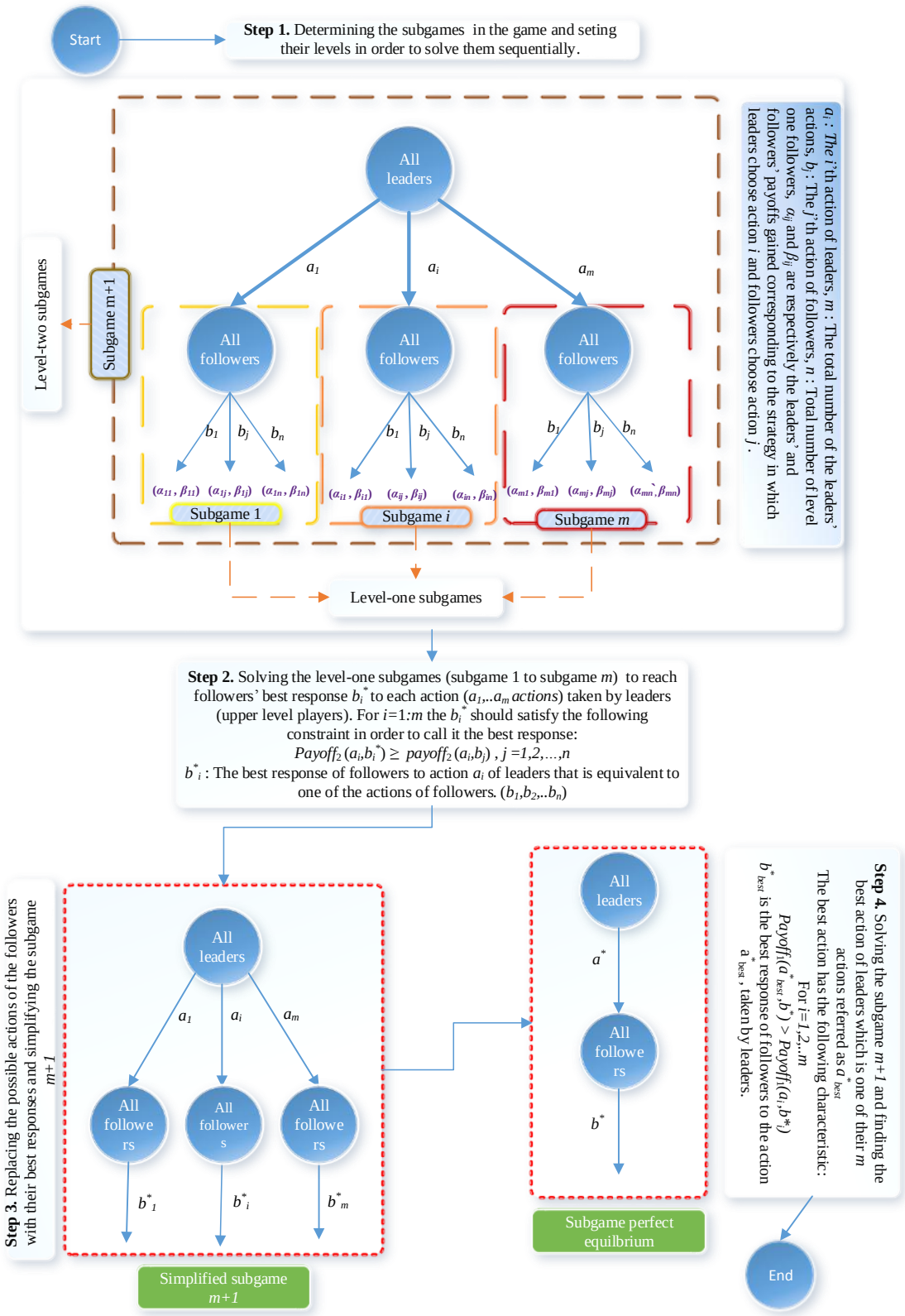

Table A1- The algorithm for determining an appropriate scenario based on recursive induction method

شکل پ-۱- الگوریتم تعیین سناریوی مناسب مبتنی بر روش استقرای بازگشتی (Motlaghzadeh et al., 2020)

- تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب

در این مقاله، پنج معیار مهم اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، تاب‌آوری در برابر رخدادهای با احتمال نامشخص و شاخص اکولوژیکی برای محاسبه تاب‌آوری عرضه و تقاضای آب استفاده می‌شوند.

- اعتمادپذیری

استفاده از معیارهای عملکرد امکان ارزیابی و مقایسه سناریوهای مدیریتی را فراهم می‌کند. معیار اول اعتمادپذیری است که میزان موفقیت در تأمین نیاز را در گام زمانی منتخب مشخص می‌کند. به عبارت دیگر، این معیار میزان موفقیت در تأمین نیاز آبی در طول دورهٔ زمانی برنامه‌ریزی را تعیین می‌کند. این معیار به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Coverage proportion}_t^j\ (\%) = \frac{SW_t^j}{WD_t^j} * 100 \qquad (پ-۱)$$

که در آن، $\text{Coverage proportion}_t^j$ معیار اعتمادپذیری برای گره j اُم در گام زمانی t و SW و WD به ترتیب عرضه و تقاضای آب هستند.

- برگشت‌پذیری

معیار دوم برگشت‌پذیری است که با توانایی بازیابی پس از شکست تعریف می‌شود. در محاسبه این معیار باید به نکاتی توجه داشت. اولین نکته‌ای که باید درنظر داشت این است که اگر میزان نیاز آبی به صورت کامل تأمین نشود، این حالت شرایط شکست درنظر گرفته می‌شود. بسته به شدت شکست در هر گام زمانی و میزان تأمین آب در گام زمانی بعدی، این شاخص محاسبه می‌شود. اگر مقدار پوشش نیاز آبی (نیاز آبی تأمین‌شده) در گام زمانی t کمتر از پوشش نیاز آب در گام زمانی t+1 باشد، مقدار این شاخص صفر خواهد بود. در غیر این‌صورت، شاخص برگشت‌پذیری به‌صورت زیر محاسبه خواهد شد (Jahanshahi and Kerachian, 2019):

(پ-۲)

$$\text{Resiliency}_t^j = \begin{cases} 100 & \text{if } \text{Coverage}_t^j = 100 \\ \dfrac{(\text{Coverage}_{t+1}^j - \text{Coverage}_t^j)}{100 - \text{Coverage}_t^j} * 100, & \text{if } \begin{cases} \text{Coverage}_t^j < 100 \\ \text{Coverage}_{t+1}^j \geq \text{Coverage}_t^j \end{cases} \\ 0 & \text{if } \begin{cases} \text{Coverage}_t^j < 100 \\ \text{Coverage}_{t+1}^j \leq \text{Coverage}_t^j \end{cases} \end{cases}$$

برای محاسبه برگشت‌پذیری در برابر تقاضای کشاورزی و محیط‌زیست، میزان آب تأمین شده (Coverage) قابل توجه است. به عنوان مثال، اگر میزان پوشش گره کشاورزی در گام زمانی t کمتر از یک آستانه مهم مثل نقطه پژمردگی (wilting point) گیاه باشد، در گام زمانی بعدی در آن فصل رشد گیاه، برگشت‌پذیری صفر خواهد بود. بنابراین، هنگامی که پوشش در مرحله زمانی t پایین‌تر از آستانه بحرانی باشد، معیار برگشت‌پذیری در گام زمانی t + 1 برابر با صفر خواهد بود. در این مقاله، تنها تقاضای آب بخش‌های کشاورزی و محیط‌زیست دارای آستانه‌های بحرانی هستند و برای دیگر گره‌های تقاضا، آستانه بحرانی‌ای برای محاسبه برگشت‌پذیری درنظر گرفته نشده است. در مقاله حاضر، نقطه پژمردگی محصولات کشاورزی برابر با ۳۰ درصد میزان تقاضای آب آنها درنظر گرفته شد. برای بخش شهری و صنعت، این آستانه ۱۰۰ درصد درنظر گرفته شده است. علاوه بر این، برای حفظ اکوسیستم محلی و جلوگیری از خسارت شدید به بخش‌های محیط‌زیستی، آب اختصاص یافته به این بخش باید برابر یا بیش از ۵۰ درصد تقاضای محیط‌زیستی باشد. از این‌رو، معیار برگشت‌پذیری گره‌های کشاورزی و محیط‌زیست به گونه‌ای اصلاح شده است که می‌توان این محدودیت‌ها را درنظر گرفت:

(پ-۳)

$$\text{Res}_{\text{Agr}_t} = \begin{cases} 100 & \text{if } \text{Coverage}(t-1) \geq 100 \\ \left(\dfrac{\text{Coverage}(t) - \text{Coverage}(t-1)}{100 - \text{Coverage}(t-1)}\right) * 100, & \text{if } \begin{cases} 30 < \text{Coverage}(t-1) < 100, \\ \text{Coverage}(t) > \text{Coverage}(t-1) \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(پ-۴)

$$\text{Res} - \text{Env}_t = \begin{cases} 100 & \text{if } \text{Coverage}(t-1) >= 100 \\ \left(\dfrac{\text{Coverage}(t) - \text{Coverage}(t-1)}{100 - \text{Coverage}(t-1)}\right) * 100, & \text{if } \begin{cases} 50 < \text{Coverage}(t-1) < 100, \\ \text{Coverage}(t) > \text{Coverage}(t-1) \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

- آسیب‌پذیری

معیار سوم، مربوط به آسیب‌پذیری بخش‌های مربوط به نیاز آبی (شهری، صنعت و غیره) است که نشان‌دهندهٔ میزان اثر شرایط شکست بر بخش‌ها در دوره زمانی برنامه‌ریزی است. در واقع، این معیار شدت شکست بخش‌ها را نشان می‌دهد. محاسبه این شاخص به صورت زیر انجام می‌پذیرد:

$$Vul_t^j = \begin{cases} WD_t^j - SW_t^j, & \text{if } WD_t^j > SW_t^j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (پ-۵)$$

برای محاسبه آسیب‌پذیری مبتنی بر درجهٔ باور، مقادیر نرمال شده آنها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Vul_{Norm}(t) = [(Vul_t^j - \text{Min}(Vul)/\text{Max}(Vul) - \text{Min}(Vul)] * 100 \qquad (پ-۶)$$

که در آن، $Vul_{Norm}(t)$ آسیب‌پذیری نرمال شدهٔ گره تقاضای j ام در گام زمانی t، Vul_t^j مقدار آسیب‌پذیری و Max(Vul) و Min(Vul) به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل آسیب‌پذیری است که باید برای هر گره تقاضای آب محاسبه شوند.

- تاب‌آوری در برابر رخدادهای با احتمال نامشخص (4R)

در این بخش، برای تعیین این معیار، چهار معیار اصلی صلابت، تدبیر، افزونگی و سرعت در برگشت (4R) به عنوان معیارهای اصلی این بخش تعریف می‌شوند. معیار اول بیانگر توانایی ذاتی سیستم منابع آب در برابر حوادث خشکسالی است که تضمین‌کنندهٔ ثبات اولیه سیستم هنگام رخداد خشکسالی می‌باشد. معیار دوم به بسیج منابع، اولویت‌بندی مهمترین وظایف و پاسخگویی اضطراری به حوادث خشکسالی اشاره دارد. معیار سوم استفاده از منابع اضافی موجود در برابر خشکسالی را در نظر می‌گیرد و معیار چهارم نشان می‌دهد که پس از وقوع خشکسالی، سیستم چقدر سریع بازیابی می‌شود. این معیارهای اصلی متقابلاً منحصر به فرد هستند و تاب‌آوری سیستم را در برابر خشکسالی شدید با احتمال نامشخص معین می‌کنند. برای ارزیابی هر کدام از معیارهای 4R، چند زیرمعیار تعریف می‌شود که تغییرات زمانی آنها باید تعیین شود. این معیارهای فرعی متعلق به جنبه‌های هیدرولوژیکی، هواشناسی، کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی است. در جدول (پ–۱)، زیرمعیارهای انتخاب شده برای تعیین کمیت تاب‌آوری شدید ارائه شده است. زیرمعیارهای مذکور بر اساس بررسی مطالعات گذشته و قضاوت‌های مهندسی انتخاب شده‌اند. برای تعیین کمیت تاب‌آوری تمامی سناریوهای عرضه و تقاضای آب در برابر خشکسالی شدید با احتمال نامشخص، تمام زیرمعیارهای این معیار ارزیابی و تلفیق می‌شوند. در این مقاله، برای تلفیق زیر معیارهای مبتنی بر درجه باور از نظریه استنتاج شهودی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که برای ارزیابی مقادیر مبتنی بر درجه باور زیرمعیارها، سری زمانی آنها باید محاسبه شود. هر کدام از زیرمعیارها یا دارای یک سری زمانی برای دوره ۲۰۴۹–۲۰۱۹ هستند یا یک نمره ارزیابی بخصوص به خودشان اختصاص می‌دهند.

- شاخص اکولوژیکی

با فرض تعامل بین محدوده مطالعاتی و تالاب و محیط اطراف، شاخص اکولوژیکی نیز باید به صورت کمّی ارزیابی شود. برای همین منظور، تفاوت بین ارتفاع متوسط آب و ارتفاع قابل قبول تالاب (ارتفاع اکولوژیکی) به شرح زیر به منظور محاسبه شاخص مذکور مدنظر قرار می‌گیرد:

$$EI_t = Elev_t - Eco_Elev_t \qquad (پ–۷)$$

جایی که EI_t، $Elev_t$ و Eco_Elev_t به ترتیب شاخص اکولوژیک، ارتفاع متوسط آب تالاب و ارتفاع اکولوژیکی آن در سال t را در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهند. ارتفاع اکولوژیکی با توجه به شرایط محیطی مناسب برای تالاب به عنوان زیستگاه گونه‌های غالب آن انتخاب می‌شود. برای محاسبه $Elev_t$، لازم است حجم سالانه دریاچه ارومیه با استفاده از معادله بیلان آب به شرح زیر تعیین شود:

$$V_{t+1} = V_t + I_t + Gw_t + P_t * A_t - Evap_t * A_t \qquad (پ–۸)$$

که در آن، V_t و A_t میانگین سالانه حجم و سطح در سال t هستند. همچنین، I_t، Gw_t، P_t و $Evap_t$ به ترتیب ورودی سالانه، ورودی خالص آب زیرزمینی، بارش و تبخیر هستند. پس از محاسبهٔ V_t، $Elev_t$ با استفاده از منحنی‌های حجم–سطح–ارتفاع تخمین زده می‌شود. برای محاسبه شاخص محیط‌زیستی، به عنوان معیار پنجم، حجم سالانه از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۴۹ برای هر سناریو برآورد می‌شود. متغیرهایی همچون ورودی سالانه به دریاچه، ورودی از آبهای زیرزمینی، بارش، تبخیر از دریاچه و حجم و مساحت دریاچه ارومیه باید تخمین زده شود.

Table A1- The selected sub-criteria of each criterion for quantifying the resilience of the system under severe droughts

جدول پ-۱- زیرمعیارهای انتخاب شده برای کمی‌سازی تاب‌آوری سامانه در شرایط خشکسالی شدید

(Behboudian and Kerachian, 2021)

Robustness	Redundancy	Resourcefulness	Rapidity
↑↑ RO_1: Accessible water resources such as rivers	↑↑ RD_1: Assessing the capability of water resources transferring projects	↑↑ RS_1: Accessibility of basic data	↑↓ RA_1: The growth rate of the population
↑↓ RO_2: Economic vulnerability of the system	↑↑ RD_2: Availability of groundwater resource	↑↑ RS_2: Existence of risk and disaster management plans	↑↑ RA_2: Virtual practices for facing droughts
RO_3: Geographical classification such as a mountain, forest, and desert (forests: high robustness; deserts: low robustness)	↑↑ RD_3: Modern agricultural irrigation methods	↑↑ RS_3: Additional budget allocation for drought event	↑↑ RA_3: Public Awareness about demand management during droughts
↑↑ RO_4: Annual rainfall	↑↑ RD_4: Prioritizing water allocations during droughts	↑↑ RS_4: Existence of drought warning and forecasting systems	↑↓ RA_4: Intensity of droughts
↑↑ RO_5: Historical drought experience of the system	↑↑ RD_5: Operation policies in reservoirs under drought event	↑↑ RS_5: Availability of drought vulnerability maps	↑↑ RA_5: Preparedness of organizations
↑↓ RO_6: Annual temperature	↑↑ RD_6: Possibility of transferring treated wastewater from treatment plants	↑↑ RS_6: Cooperation between organizations for drought management	↑↑ RA_6: Geopolitical significance of the study area
↑↓ RO_7: Water consumption	-	-	-
↑↑ RO_8: Existence of occupational and livelihood plans	-	-	-

↑↑: If the value of a sub-criterion increases, the value of the criterion will increase.
↑↓: If the value of a sub-criterion increases, the value of the criterion will decrease.

Table A2- Details of the proposed water resources management scenarios

جدول پ-۲- جزئیات سناریوهای پیشنهادی مدیریت منابع آب (Behboudian and Kerachian, 2021)

Scenario	Increase in the area of agricultural lands	Transfer water from Zaab river to Lake Urmia (2014-2018)	Agricultural water demand reduction during different time horizons					Cost ($\times 10^6$ dollars)
S1*	-	✓	20% until 2019	-	-	-	-	838.5
S2	-		20% until 2019	25% until 2020	-	-	-	937.59
S3	-	✓	20% until 2019	25% until 2025	-	-	-	1098.2
S4	-	✓	20% until 2019	25% until 2020	30% until 2021	-	-	1049.21
S5	-	✓	20% until 2019	30% until 2025	-	-	-	1131.14
S6	-	✓	20% until 2019	25% until 2020	30% until 2021	35% until 2022	40% until 2023	1272.53
S7	-	✓	20% until 2019	30% until 2025	40% until 2030	-	-	1468.16
S8	-	✓	20% until 2019	35% until 2025	40% until 2030	-	-	1610.98
S9	-	✓	20% until 2019	25% until 2025	40% until 2030	-	-	1996.03
S10	5%	✓	20% until 2019	-	-	-	-	861.27
S11	5%	✓	20% until 2019	25% until 2020	-	-	-	965.03
S12	5%	✓	20% until 2019	25% until 2025	-	-	-	1133.68
S13	5%	✓	20% until 2019	25% until 2020	30% until 2021	-	-	1082.25
S14	5%	✓	20% until 2019	30% until 2025	-	-	-	1168.25
S15	5%	✓	20% until 2019	25% until 2020	30% until 2021	35% until 2022	40% until 2023	1316.73
S16	5%	✓	20% until 2019	30% until 2025	40% until 2030	-	-	1522.15
S17	5%	✓	20% until 2019	35% until 2025	40% until 2030	-	-	1672.00
S18	5%	✓	20% until 2019	25% until 2025	40% until 2030	-	-	2076.41

*Based on technical reports developed by ULRP, S1 is a baseline scenario and 20% of agricultural water demand has been reduced in the study area in the period of 2014-2019.

No. of questionnaire:

Date: Institution name:

1- What's the role of your institution in the improvement of the conditions of Lake Urmia [1]?

2- In your opinion, what are the main reasons of the current problems of Lake Urmia?

3- Does your institution have an authority to enhance the water level condition of Lake Urmia?

2) Low level of authority 1) Very low level of authority 0) Without authority
5) Very high level of authority 4) High level of authority 3) Average level of authority

If your institution has the authority to enhance the water level of Lake Urmia, please elucidate the power and effectiveness of your institution.

4- How highly is your institution affected by the management policies adopted in the Lake Urmia Basin?
0) Without effect 1) Very low level of effect 2) Low level of effect

5) Very high level of effect 4) High level of effect 3) Average level of effect

If your institution is affected by the adopted management policies, please explain how your institution is affected.

5- How do you assess the accessibility of your institution to the available data about the lake's condition and the management scenarios?
0) Without access 1) Very low level of access 2) Low level of access

5) Very high level of access 4) High level of access 3) Average level of access

If your institution has conducted studies to improve the water status of Lake Urmia, please answer the following question:

6- Depending on the different conditions of the water level of Lake Urmia, determine the effectiveness of each scenario in the next table in terms of the overall goals of your institution.

Impact of scenario:

1) Very high usefulness rate 2) High usefulness rate 3) Average usefulness rate 4) Low usefulness rate
5) Useless 6) Vague

1- It should be noted that more emphasis is on the Zarrinehrud river basin, located in the southern part of Lake Urmia.

Table A3- The impact of each scenario on main goals of any organization in different water levels

جدول پ-۳- اثر اجرای سناریوهای مدیریتی بر اهداف کلی گروداران در ترازهای مختلف دریاچه

	Scenario	The impact of the scenario at high-water level[1] condition	The impact of the scenario at average-water[2] level condition	The impact of the scenario at low-water level[3] condition
Control and reduction of water consumption in agricultural sector	Modern irrigation method projects (Study and implementation of low-pressure irrigation, implementation of local pressure irrigation (drop) , implementation of sprinkler irrigation systems)			
	Projects related to the improvement of irrigation and drainage networks and related facilities (Study and implementation of irrigation and drainage sub-networks at the end of Novrouzloo diversion dam, study and implementation of water transfer through pipes)			
Control and reduction of water consumption in agricultural sector	Agricultural improvement projects (low cost) (less than 1.18 million U.S. dollars) (Cultivation of early and middle cultivars of corn and cultivation of corn seedlings, changing the cultivation pattern of chickpeas and lentils from spring to autumn)			
	Agricultural improvement projects (average cost) (between 1.18 to 4.72 million U.S. dollars) (Cultivation of wheat cultivars with less water requirements, plan to Barley is being replaced, monitoring the issuance of optimal agricultural licenses in the catchment area of Lake Urmia, plan to replace alfalfa with low-demand forage crops)			
	Agricultural improvement projects (high cost) (more than 4.72 billion U.S. dollars) (Development of methods for cultivation and under-irrigation of sugar beet, improvement and revitalization of grade 2 orchards, removal and replacement of grade 3 orchards, conservation agriculture in the catchment area of Lake Urmia)			
Control and reduction of withdrawals from surface and groundwater resources (Prohibition of any increase in withdrawals from the resources of the basin and prevention of unauthorized withdrawals, suspension of all dam construction projects)				
Reduction negative effects of basin's water scarcity projects (identification of dust-prone zones and their stabilization, preparation of employment increase program and alternative livelihood by relevant agencies)				
Water supply for the lake from new sources (Study of water transfer plan from Caspian Lake to Lake Urmia, implementation of water transfer project from Aras River to Lake Urmia, implementation of water transfer project from Zab River to Lake Urmia basin)				
Facilitate and increase the volume of inflow to the lake (rivers' water transfer to the lake, transfer of water to the islands and wetlands of Lake Urmia from Hasanlu dam)				
Study and software measures (Development and implementation of a comprehensive program of education, information, awareness and public participation, preparation of land cadaster of Lake Urmia catchment area, design and implementation of decision-making system for integrated management of Lake Urmia basin)				

7- According to different water level status of Lake Urmia, determine the priority of your institution based on the following measures in the following table.

[1] Lower than 1271.5 meters (ecological water level of Lake Urmia is 1271.5 m)

[2] Between 1271.5 and 1274.5 meters

[3] Higher than 1274.1 meters

1) Very low level of importance 2) Low level of importance 3) Average level of importance 4) High level of importance 5) Very high level of importance

Table A4- Determining the priority of institution with regard to the following measures
جدول پ-۴- تعیین ارجحیت سازمان‌ها با درنظرگیری معیارهای موجود درترازهای مختلف دریاچه ارومیه

Priority of your institution	High-water level condition	High-water level condition	High-water level condition
Supplying municipal water demand			
Supplying agricultural water demand			
Supplying industrial water demand			
Supplying ecological water demand			
Improving employment and livelihood status of the people			
Economical profit of your institute			
Food security			
Drought adjustment			
Climate regulation			

8- Please fill the next table according to the following measures.

Authority level:
1) Very low 2) Low 3) Average 4) High 5) Very high
Benefit level:
1) Very low 2) Low 3) Average 4) High 5) Very high
Amount and intensity of relationship:
0) Without relationship 1) Very low rate of relationship 2) Low rate of relationship
3) Average rate of relationship 4) High rate of relationship 4) Very high rate of relationship
Type of relationship:
+) Collaborative and interactive (positive)
-) Non-cooperative and conflicting (negative)
The rate of exchange of the basic information:
1) Very low 2) Low 3) Average 4) High 5) Very high

Table A5- Determining the priority of institution with regard to the following measures
جدول پ-۵- تعیین ارجحیت سازمان‌ها با درنظرگیری معیارهای موجود درترازهای مختلف دریاچه ارومیه

Institution	The authority of the institutions on policy making in the Zarrinehrud river basin	The rate of affectability of institutions from the status of the Zarrinehrud river basin	The relationship's intensity of your institution with each of the institutions Note: Please leave your institution line blank.	Type of your institution's relationship with any of other institutions Note: Please leave your institution line blank.	The exchange rate of basic information between your institution and other ones Note: Please leave your institution line blank.
Ministry of Industry, Mining and Trade					
Ministry of Health and Medical Education					
Ministry of Economic affairs and Finance					
Ministry of Energy					
Ministry of Agriculture Jihad					
Urmia Lake Restoration National Committee					
Members of Parliament					
Ministry of Interior					
Plan and Budget Organization					

۶- مراجع

Ahmadi A (2017) Water and wastewater resources management in urban areas with an emphasis on social networks analysis. M.Sc. Thesis, School of Civil Engineering, University of Tehran (In Persian)

Ashrafi S, Kerachian R, Pourmoghim P, Behboudian M, and Motlaghzadeh K (2022) Evaluating and improving the sustainability of ecosystem services in river basins under climate change. Science of the Total Environment 806:150702

Barari M, Bagheri A, Hashemi S (2016) Analysis of the issues of Lake Zrêbar in a context of integrated water resources management using a stakeholders' participatory approach in a basin scale. Iran-Water Resources Research 12(2):1-12 (In Persian)

Behboudian M (2021) Developing a framework for assessing the resilience of basin-wide ecosystem restoration scenarios. Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, University of Tehran (In Persian)

Behboodian M and Kerachian R (2019) Sustainability assessment of basin-wide water supply and demand scenarios using Intelligent Decision System (IDS) model. Iran-Water Resources Research 15(4):314-327 (In Persian)

Behboudian M, Kerachian R, and Mahjouri N (2022) Developing an uncertainty-based framework for assessing the resiliency of basin-wide water supply and demand scenarios. Iran National Science Foundation, 103p (In Persian)

Behboudian M and Kerachian R (2021) Evaluating the resilience of water resources management scenarios using the evidential reasoning approach: The Zarrinehrud river basin experience. Journal of Environmental Management 284:112025

Behboudian M, Kerachian R, Motlaghzadeh K, and Ashrafi S (2021a) Evaluating water resources management scenarios considering the hierarchical structure of decision-makers and ecosystem services-based criteria. Science of The Total Environment 751:141759

Behboudian M, Kerachian R, and Pourmoghim P (2021b) Evaluating the long-term resilience of water resources systems: Application of a generalized grade-based combination approach. Science of The Total Environment 786:147447

Behboudian M, Kerachian R, and Hosseini M (2021) Application of information fusion techniques and satellite products in the optimal redesign of rain gauge networks. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 35(8):1665-1680

Behzadian K, Kapelan Z, and Morley M S (2014). Resilience-based performance assessment of water-recycling schemes in urban water systems. Procedia Engineering 89:719-726

Chen Y, Lu H, Li J, Ren L, and He L (2017). A leader-follower-interactive method for regional water resources management with considering multiple water demands and eco-environmental constraints. Journal of Hydrology 548:121–134

Emami F, and Koch M (2019) Modeling the impact of climate change on water availability in the Zarrine River Basin and inflow to the Boukan Dam, Iran. Climate 7(4):51

Geng G and Wardlaw R (2013) Application of multi-criterion decision making analysis to integrated water resources management. Water Resources Management 27(8):3191-3207

Hämäläinen R P, Kettunen E, Ehtamo H, and Marttunen M (2001) Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management. Group Decision and Negotiation 10(4):331-353

Karamouz M and Zahmatkesh Z (2017) Quantifying resilience and uncertainty in coastal flooding events: Framework for assessing urban vulnerability. Journal of Water Resources Planning and Management 143(1):04016071(1-19)

Karamouz M, Zeynolabedin A, and Olyaei M A (2016) Regional drought resiliency and vulnerability. Journal of Hydrologic Engineering 21(11):05016028 (1-12)

Liu F, Zhu W dong, Chen Y wang, Xu D ling, and Yang J bo (2017) Evaluation, ranking and selection of Rand D projects by multiple experts: An evidential reasoning rule based approach. Scientometrics 111(3):1501-1519

Muchangos L S, Tokai A, and Hanashima A (2017) Stakeholder analysis and social network analysis to evaluate the stakeholders of a MSWM system–A pilot study of Maputo City. Environmental Development 24:124-135

Neitsch S, Arnold J, Kiniry J, and Williams J (2011) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute

Pourmoghim P, Behboudian M, and Kerachian R (2022) An uncertainty-based framework for evaluating and improving the long-term resilience of lakes under anthropogenic droughts. Journal of Environmental Management 301:113900

Safari N, Zarghami M, and Szidarovszky F (2014) Nash bargaining and leader-follower models in water

allocation: Application to the Zarrinehrud River basin, Iran. Applied Mathematical Modelling 38(7-8):1959-1968

Socio-Cultural Committee of Urmia Lake Restoration National Committee (ULRNC) (2015) Stakeholder Identification, Analysis and Classification Report (OC02RN9406053) (In Persian)

Socio-Cultural Committee of Urmia Lake Restoration National Committee (ULRNC) (2018) Report on social, cultural and media activities of ULRNC (OC02RN9708093) (In Persian)

T L Saaty (1980) Agricultural economics review the analytic hierarchy process. vol. 70, Mcgraw Hill, New York

Sweetapple C, Astaraie-Imani M, and Butler D (2018) Design and operation of urban wastewater systems considering reliability, risk and resilience. Water Research 147:1-12

Wang C H, Blackmore J, Wang X, Yum K K, Zhou M, Diaper C, … Anticev J (2009) Overview of resilience concepts, with application to water resource systems. Canberra: eWater http://ewaterinstitute.org/uploads/files/ResilienceConcepts.pdf

Wu Y, Wang Z, Ding S, and Zhang H (2018) Leader-follower consensus of multi-agent systems in directed networks with actuator faults. Neurocomputing 275:1177-1185