

Assessing Uncertainty and Reliability of Indicators
Affecting Water Resources Carrying CapacitySh. Fathi^{*1}, V. Nourani², M. T. Aalami³, and
S. Sadeghfam⁴

Abstract

Sustainable water resources management requires establishing a balance between the parameters of the water budget equation to achieve sustainable development goals. Additionally, water balance studies should structurally consider interactions among hydrological, economic, social, and environmental sectors to identify factors causing instability and worsening challenges in watersheds. For this reason, several indicators have been developed to comprehensively assess these sectors within watersheds. Water resources carrying capacity has been proposed as an indicator that evaluates the ability of water resources to support socio-economic, population, and environmental issues over time. This study aimed to examine the water resources carrying capacity in the Qarraq watershed in northwest Iran, focusing on the uncertainty and reliability of parameters affecting it, particularly climate change factors and anthropogenic activities. The study used an advanced evapotranspiration model that combines grey theory, entropy, and Z numbers. A system dynamics model was created to analyze feedback among environmental, economic, and social subsystems. Based on the pressure-state-response framework, previous research, and expert inputs, eleven indicators positively or inversely impacting water resource carrying capacity were identified. These indicators were weighted by integrating grey theory's reliability concept and entropy. The values of water resource carrying capacity from 2000 to 2020 were then extracted, and linguistic variables were applied to interpret the results. The findings showed a shift from a "poor" state in 2000 to a "good" state in 2020, with the water resource carrying capacity in the final years reaching a "fair" reliability. To rank these indicators, the Z numbers were integrated into the TOPSIS model, forming the Z-TOPSIS method. The findings revealed that evapotranspiration ranked first, followed by environmental and social indicators such as agricultural land development (as an index for land-use change) and population. This research underscores the importance of comprehensive watershed assessments, especially in arid and semi-arid regions affected by evapotranspiration. It highlights the need to incorporate reliability and uncertainty, using linguistic variables, into water resource assessments and advocates for innovative applications of Z-numbers and grey entropy in water management.

Keywords: Water Resources Carrying Capacity, System Dynamics, Entropy, Z-Numbers, Similarity to Ideal Solution, Qarraq Watershed.

Received: April 9, 2025

Accepted: September 28, 2025

ارزیابی عدم قطعیت و قابلیت اطمینان شاخص‌های مؤثر
بر ظرفیت برد منابع آبشاهین فتحی^{*۱}، وحید نورانی^۲، محمد تقی اعلمی^۳ و سینا
صادق فام^۴

چکیده

مدیریت منابع آب پایدار مستلزم برقراری تعادل بالقوه میان پارامترهای معادله بیلان آب برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار است. همچنین، در مطالعات بیلان آب به‌طور ساختاری می‌بایست اثرات متقابل بخش‌های هیدرولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی لحاظ شود تا بتوان اثرات عوامل متعددی که باعث بی‌ثباتی و تشدید چالش‌ها در حوضه‌ها می‌شوند، شناسایی نمود. برای این منظور شاخص‌های متعددی به‌منظور ارزیابی همه‌جانبه بخش‌های مختلف محیطی، اقتصادی و اجتماعی در حوضه‌ها ایجاد شده‌اند. ظرفیت برد منابع آب به‌عنوان شاخصی که توانایی منابع آب برای پشتیبانی از مسائل اجتماعی-اقتصادی، جمعیت و محیط‌زیست در بازه زمانی مشخص را ارزیابی می‌کند، پیشنهاد شده است. هدف این مطالعه بررسی ظرفیت برد منابع آب در حوضه قرنق در شمال غرب ایران تحت تأثیر عدم قطعیت و قابلیت اطمینان پارامترهای مؤثر بر آن، با تأکید بر پارامترهای تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی با استفاده از یک مدل توسعه‌یافته تیخیر و تعرق، ترکیب تئوری خاکستری، آنتروپی و اعداد Z است. یک مدل پویایی‌شناسی سیستم برای بررسی بازخورد زیرسیستم‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی ساخته شد. با استفاده از چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ، مطالعات قبلی و نظر خبرگان یازده شاخص مؤثر بر ظرفیت برد منابع آب در حوضه قرنق شناسایی شد که برخی ماهیت مثبت و برخی ماهیت معکوس دارند. شاخص‌ها شناسایی شده، با استفاده از ادغام مفهوم قابلیت اطمینان در تئوری خاکستری و آنتروپی، وزن‌دهی شدند. سپس مقادیر ظرفیت برد منابع آب در بازه ۲۰۰۰-۲۰۲۰ استخراج و متغیرهای زبانی در مقادیر به‌دست‌آمده اعمال شدند. نتایج حاکی از تغییر وضعیت ظرفیت برد منابع آب حوضه از حالت "فقیر" در سال ۲۰۰۰ به حالت "خوب" در سال ۲۰۲۰ بوده و در سال‌های پایانی مطالعه وضعیت "خوب" ظرفیت برد منابع آب حوضه با قابلیت اطمینان "قابل قبول" همراه است. به‌منظور رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر بر ظرفیت برد منابع آب از ادغام اعداد Z در مدل TOPSIS تحت عنوان روش Z-TOPSIS استفاده شد. رتبه اول توسط شاخص تیخیر و تعرق و جایگاه‌های بعدی به شاخص‌های محیطی و اجتماعی نظیر توسعه اراضی کشاورزی به‌عنوان نشانگر تغییر کاربری اراضی و جمعیت اختصاص یافت. این مطالعه ضرورت ارزیابی وضعیت هم‌جانبه در حوضه‌ها بالخصوص تحت تأثیر تیخیر و تعرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک را بیان نموده و اهمیت یکپارچه‌سازی قابلیت اطمینان و عدم قطعیت بر اساس متغیرهای زبانی را در ارزیابی‌های منابع آب برجسته می‌کند و استفاده نوآورانه از اعداد Z و آنتروپی خاکستری را در مدیریت مسائل آب افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: ظرفیت برد منابع آب، پویایی‌شناسی سیستم، آنتروپی، اعداد Z، شباهت

به گزینه ایده‌آل، حوضه قرنق.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۷/۶

1- Ph.D., Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: Sh.Fathi@Tabrizu.ac.ir

2- Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: Nourani@Tabrizu.ac.ir

3- Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: Mtaalami@Tabrizu.ac.ir

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran. Email: S.sadeghfam@Maragheh.ac.ir

* - Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.515812.2848](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.515812.2848)

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

۲- استاد گروه آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- استاد گروه آب، دانشکده فنی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

* - نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۵ امکان‌پذیر است.

WRCC تالاب انزلی (Keyvanfar et al., 2025) صورت پذیرفته است.

به طور کلی، محاسبه WRCC شامل سه مرحله تعریف شاخص‌های ارزیابی، محاسبه وزن شاخص‌ها و ساخت مدل ارزیابی است (Wang et al., 2022). مطالعات نشان می‌دهند در ارزیابی WRCC استفاده از پویایی‌شناسی سیستم^۴ (SD) رایج‌تر است (Yang et al., 2022). SD با تمرکز بر حلقه‌های بازخوردی^۵ درون سیستم، تأثیرات غیرخطی و تأخیرهای زمانی موجود بین متغیرها، به بررسی رفتارهای یک سیستم می‌پردازد (Forrester, 1971). استفاده از این ابزار در مسائل مدیریت منابع آب که به دلیل برهم‌کنش مسائل محیطی، اقتصادی و اجتماعی که دارای پیچیدگی بسیار است، می‌تواند اثربخش‌تر باشد. در مدیریت یکپارچه منابع آب^۶ (IWRM) از سه زیرسیستم محیطی، اقتصادی و اجتماعی در بسیاری از مطالعات استفاده شده است (Phan et al., 2021). در مفهوم WRCC تبیین دقیق ظرفیت‌های محیطی جهت پوشش توسعه‌های اجتماعی و اقتصادی حائز اهمیت است. لذا می‌بایست نگرش سیستماتیک به ظرفیت‌های محیطی بر اساس مطالعات معادله بیلان آب^۷ داشت. همچنین، در صورت ارائه راهبردهای مدیریت در حوضه‌های آبریز بدون توجه به اثرات بالقوه آن‌ها بر اجزای بیلان آبی، علاوه بر ایجاد ناپایداری^۸، ابعاد جدیدی از چالش‌ها در حوضه‌ها ایجاد می‌شود. واكوی معادله بیلان آبی که بتواند در عین سادگی، توانایی بیان تغییرات محیطی و اقلیمی منابع آب را داشته باشد، حائز اهمیت است. معادله تورنت وایت^۹ (Thornthwaite, 1948) به ساده‌ترین شکل معادله بیلان آب شناخته شده است و از میان پارامترهای مؤثر در این معادله، تبخیر و تعرق^{۱۰} به‌عنوان یک پارامتر مهم در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. به‌کارگیری مدل‌های تبخیر و تعرق که بتوانند اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را لحاظ نمایند حائز اهمیت است. در مطالعات جدیدی که در برآورد تبخیر و تعرق صورت پذیرفته مدلی تحت عنوان پنمن-مانتیث-لیونینگ^{۱۱} (PML) ارائه شده است که این مدل اثرات پوشش گیاهی، غلظت CO₂ و بارش را در محاسبات میزان تبخیر و تعرق لحاظ می‌نماید (Zhang et al., 2016). با استفاده از مدل PML می‌توان ارتباط بین نوع فعالیت‌های انسانی^{۱۲} را با معادله بیلان آب برقرار نمود (Nourani et al., 2024).

پس از مدل‌سازی زیرسیستم‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی و برقراری ارتباط مناسب میان پارامترهای مؤثر هر زیرسیستم، به‌منظور ارزیابی کمی WRCC، لازم است پارامترهای مؤثر بر WRCC بر اساس مطالعات قبلی، نظر خبرگان و یا چارچوب‌هایی انتخاب شوند. سپس با استفاده از روش‌های متعدد وزن‌دهی نظیر

مدیریت پایدار منابع آب، به مفهوم ایجاد توازن بین ظرفیت‌های آبی هر منطقه و تحقق اهداف توسعه اجتماعی و اقتصادی است. برای بیان این مهم می‌توان از مفهوم "ظرفیت برد"^{۱۱} استفاده نمود. ظرفیت برد برای شبیه‌سازی سیستم جفت شده انسان-محیط به‌صورت رویکردی جامع باهدف توسعه پایدار^۲، به‌جای تأکید فقط بر انسان یا طبیعت است (Peng et al., 2016). مفهوم ظرفیت برد در علوم مختلف و همچنین، در بخش آب تسری یافته و تحت عنوان ظرفیت برد منابع آب^۳ (WRCC) معرفی می‌شود. به دلیل پیچیدگی سیستم‌های منابع آب و ماهیت چندجانبه و سلسله‌مراتبی، عوامل متعددی بر WRCC تأثیر می‌گذارند، لذا برای این مفهوم تعاریف متعددی ارائه شده است (Luo et al., 2017). در این مطالعه مفهوم WRCC به‌صورت "حداکثر توانایی منابع آب برای پشتیبانی از مقیاس اجتماعی-اقتصادی، جمعیت و محیط‌زیست در بازه زمانی مشخص است، که با رعایت شرایط زیست‌محیطی به توسعه اقتصادی و اجتماعی هدف‌گذاری شده، می‌رسد" تعریف شده است (Mohammadi Sedaran et al., 2021). WRCC شاخص مناسبی برای تصمیم‌گیران در مباحث توسعه پایدار تلقی می‌شود (Lv et al., 2023). در سال‌های اخیر مطالعات در خصوص WRCC روند صعودی داشته و اکثر مطالعات به مسائل اجتماعی-اقتصادی پرداخته‌اند و عملکردهای مسائل اکولوژیکی و تغییرات آب و هوایی را کمتر مدنظر قرار داده‌اند (Li et al., 2023b). در مطالعه‌ای مروری ۲۷۱ مقاله بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۹ در خصوص WRCC بررسی و روش‌های محاسبه شاخص WRCC طبقه‌بندی شده است (Yang et al., 2022). مطالعه‌ای دیگر به بررسی سیستماتیک روند مطالعات WRCC بر مبنای تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی، سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی و اکوسیستم به‌منظور تهیه شاخص ارزیابی، معیارهای طبقه‌بندی و روش‌های ارزیابی و غیره پرداخته است (Li et al., 2023b). بیشتر مطالعات WRCC در ارتباط با شهرها صورت پذیرفته و به‌تدریج محققان به دنبال توسعه این مفهوم به مسائل منطقه‌ای هستند (Yang et al., 2022). در سال‌های اخیر مطالعاتی در خصوص WRCC بر روی حوضه‌های آبریز انجام شده است (Wu et al., 2018; Meng et al., 2018; Wang et al., 2018; Kang et al., 2019). در ایران نیز مطالعاتی نظیر ارزیابی WRCC در حوضه آبریز زرینه‌رود (Mohammadi Sedaran et al., 2021)، ارزیابی WRCC در شرایط تغییر اقلیم در حوضه آبریز طشک-بختگان (Abbasi et al., 2022)، ارزیابی

روش سلسله مراتبی^{۱۳} AHP (Saaty and Alexander, 1989)، روش بهترین - بدترین^{۱۴} BWM (Rezaei, 2015)، روش آنتروپی^{۱۵} (Shannon, 1948) و غیره وزن‌دهی شده و شاخص ارزیابی ایجاد شود. بعد از محاسبه WRCC، می‌توان اثرات پارامترهای مؤثر بر WRCC طی سال‌های مختلف را با رتبه‌بندی بر اساس گزینه ایده‌آل، به روش‌های نظیر روش شباهت به گزینه ایده‌آل^{۱۶} TOPSIS (Hwang and Yoon, 1981)، روش فازی^{۱۷} (Bellman and Zadeh, 1970) و غیره بررسی نمود. محاسبه و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر شاخص ارزیابی WRCC، کار اساسی ارزیابی WRCC است (Li et al., 2023b). فرآیند جمع‌آوری داده‌ها و مدل‌سازی جهت محاسبه و رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر شاخص ارزیابی WRCC با موضوع بسیار جدی عدم قطعیت^{۱۸} مواجه است. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند ناشی از جمع‌آوری داده‌ها، عدم دقت داده‌ها، ناهم‌جنس بودن داده‌ها، مدل‌سازی و غیره باشند. همچنین، اعمال تغییرات مکانی (مانند یکپارچه فرض نمودن تغییرات کاربری اراضی حوضه در مدل‌سازی) و زمانی (مانند استخراج اطلاعات سالانه از روی اطلاعات ماهانه برای برخی از پارامترها) عدم قطعیت‌هایی به موضوع WRCC اعمال می‌نمایند. در ارزیابی اطلاعات توسط کارشناسان ممکن است به دلیل تفاوت در تخصص و سوابق حرفه‌ای کارشناسان نتایج ارزیابی متفاوت باشند که باعث عدم قطعیت شود (Keshavarz-Ghorabae et al., 2021). تئوری‌های متفاوتی جهت بررسی عدم قطعیت‌های شکل‌گرفته، ایجاد شده است. تئوری فازی (Zadeh, 1965) و تئوری اعداد Z^{۱۹} که از دو جزء عدم قطعیت و قابلیت اطمینان^{۲۰} تشکیل شده و برای پوشش عدم قطعیت‌های امکانی و احتمالی به‌صورت توأم، پیشنهاد شده است (Zadeh, 2011) از این جمله‌اند. در مواجهه با مشکلات مذکور و همچنین، این واقعیت که منطق فازی، علیرغم لحاظ کردن ابهام سیستم‌ها، اما همچنان ناکامل بودن اطلاعات را پوشش نمی‌دهند، مسئله تئوری خاکستری^{۲۱} ارائه شد (Ju-Long, 1982). در مطالعات WRCC روش‌های متفاوتی در بررسی آثار عدم قطعیت بکار برده شده است که به‌طور نمونه می‌توان به روش‌های از جمله فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و روش‌های فازی (Zhang et al., 2014; Chi et al., 2019)؛ تجزیه و تحلیل زوج مجموعه‌ها و روش وزن آنتروپی (Cui et al., 2018)؛ روش اعداد Z بر مبنای متغیر زبانی (Wang et al., 2020)؛ روش ارزیابی جامع فازی (Wang et al., 2021a)؛ وزن آنتروپی و TOPSIS خاکستری (Song et al., 2024) و روش تشخیص الگوی فازی (Sun et al., 2024) اشاره نمود. مطالعات انجام‌شده به‌طور محدودی به موضوع عدم قطعیت و بالأخص

قابلیت اطمینان عدم قطعیت پرداخته‌اند. لذا نیاز به مطالعات گسترده و مبسوط در این خصوص مشاهده می‌شود. در این مطالعه سعی شده است که با ایجاد یک مدل بر مبنای SD به بررسی اندرکنش پارامترهای مؤثر بر WRCC پرداخته و در فضای عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر WRCC، با اعمال قابلیت اطمینان در آنتروپی خاکستری، مقدار WRCC در حوضه قرنقو در شمال غرب ایران محاسبه شود. همچنین، با استفاده از مدل تبخیر و تعرق PML که مداخلات انسانی را در معادله بیلان اعمال می‌نماید، به‌صورت نوآورانه نقش تغییرات کاربری اراضی در WRCC بررسی شود. سپس برای رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر WRCC از اعمال تئوری اعداد Z در TOPSIS به‌عنوان مدل Z-TOPSIS^{۲۲} استفاده شود. در فضای کمبود داده‌ها، تنوع پارامترها و استفاده از حداقل پارامترها برای ارزیابی WRCC، ادغام قابلیت اطمینان در آنتروپی خاکستری به‌منظور وزن‌دهی به پارامترهای مؤثر بر WRCC به‌عنوان یک نوآوری قابل‌ارائه است. در این مدل امکان استفاده از فراوانی متغیرهای زبانی برای استخراج قابلیت اطمینان و استفاده از فاصله هاسدورف^{۲۳} (Aliev et al., 2016) در تعیین فاصله شاخص‌های موجود با بهترین گزینه، تحت عنوان مدل Z-TOPSIS برای رتبه‌بندی پارامترهای مؤثر بر WRCC برای نخستین بار فراهم شد.

از اهداف مورد انتظار در این مطالعه می‌توان به ارزیابی WRCC حوضه قرنقو در شمال غرب ایران تحت تأثیر عدم قطعیت و قابلیت اطمینان بر اساس حداقل پارامترهای مؤثر بر WRCC، با تأکید بر پارامترهای تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی با استفاده از یک مدل توسعه‌یافته تبخیر و تعرق اشاره نمود. این اهداف با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم، ادغام مفهوم قابلیت اطمینان در آنتروپی خاکستری و مدل Z-TOPSIS میسر می‌شود.

۲- روش انجام کار و مطالعه موردی

۲-۱- مدل مفهومی مطالعه

به‌منظور بررسی IWRM سه بخش محیطی، اقتصادی و اجتماعی مورد بحث قرار گرفت که روش مطالعه در شکل ۱ تشریح شده است. این مطالعه در هفت گام صورت می‌پذیرد. در گام نخست نسبت به معرفی حوضه مورد مطالعه، مدل‌های مورد استفاده در هر سه بخش و نحوه جمع‌آوری داده و اطلاعات برای هر بخش مشخص می‌شود. در گام دوم با استفاده از پارامترهای شناسایی‌شده هر زیرسیستم مدل SD ایجاد شد، تا ارتباط بین پارامترها و استخراج مقادیر برخی از داده‌ها در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۰۰ امکان‌پذیر شود. در گام سوم با استفاده از دانش خبرگان و چارچوب فشار- وضعیت- پاسخ^{۲۴}

(PSR) پارامترهای مؤثر بر WRCC شناسایی شد، که به‌عنوان شاخص معرفی می‌شوند. در گام چهارم بعد از شناسایی شاخص‌های مؤثر نسبت به بررسی عدم قطعیت شاخص‌ها بر اساس تئوری خاکستری، تعیین قابلیت اطمینان شاخص‌ها بر مبنای فراوانی و وزن‌دهی مقدار و قابلیت اطمینان شاخص‌ها اقدام می‌شود. در گام چهارم مقدار و قابلیت اطمینان WRCC در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ محاسبه و روند تغییرات آن بررسی می‌شود. در گام ششم بر مبنای ادغام مفهوم اعداد Z در روش TOPSIS مدلی برای رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر بر WRCC ارائه شده و شاخص‌ها رتبه‌بندی می‌شود. در گام هفتم رتبه‌بندی شاخص‌ها بر مبنای مدل جدید ارائه شده که عدم قطعیت و قابلیت اطمینان را مدنظر قرار می‌دهد با مدل سنتی مقایسه می‌شود.

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز رودخانه قرنقو یکی از زیر حوضه‌های حوضه آبریز قزل‌اوزن در شمال غرب ایران در دامنه شرقی کوه سهند واقع است (شکل ۲). اقلیم حوضه قرنقو تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی و خصوصیات توپوگرافی محلی است. در حدود ۸۵/۷ درصد بارندگی‌های حوضه، طی ماه‌های آبان تا اواخر اردیبهشت و بخش اعظم آن، در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد. بارندگی سالانه کل حوضه ۴۰۳/۷ میلی‌متر است که از این میزان، به‌طور متوسط ۳۳۲/۶ میلی‌متر تبخیر می‌شود. با در نظر گرفتن میزان تبخیر و بارش، حجم آب خروجی از حوضه، ۲۵۰/۴ میلیون مترمکعب برآورد شده است (Heydari and Moghimi, 2008). حوضه قرنقو جزء حوضه‌های بسیار کم نفوذ است. به دلیل خصوصیات زمین‌شناسی، از لحاظ آب‌های زیرزمینی از ذخایر قابل توجهی برخوردار نیست ولی از لحاظ آب‌های سطحی، جزء حوضه‌های پرآب در شمال غرب ایران محسوب می‌شود (Heydari and Moghimi, 2008). در حوضه قرنقو با وجود رودهای پرآب، به دلیل سنتی بودن نظام بهره‌برداری و نبود الگوی حکمرانی مطلوب منابع آب، کشاورزی در اکثر مناطق به‌صورت

دیم انجام می‌شود. کشاورزی دیم از آسیب‌پذیری بالایی ناشی از تغییر اقلیم در مقایسه با کشاورزی آبی مواجه است، علاوه بر این، ظرفیت سازگاری پایین کشاورزان که ناشی از عوامل متعددی مانند شرایط و ناکارآمدی نهادی است، منجر به مهاجرت کشاورزان و تخلیه روستاها شده است (Ghorbani et al., 2022). به‌طوری که این حوضه با کانون‌های جمعیتی متمرکز در شهرهای هشتروند و چارایماق طی سرشماری سال‌های قبل با کاهش جمعیت مواجه شده است. بر اساس سرشماری سال ۱۳۸۵ جمعیت حوضه ۹۹۴۳۱ نفر بوده که این میزان جمعیت در سال ۱۳۹۵ به ۹۹۴۳۱ نفر کاهش یافته است (National Population and Housing Census of 2006 and 2016, Statistical Center of Iran). این حوضه با مساحت نزدیک به ۳۵۴۰ کیلومترمربع دارای اراضی عمدتاً دیم و مرتع است که بیشترین کشت در اراضی دیم به‌صورت محصول گندم است. بیشترین اشتغال در حوضه، مربوط به بخش کشاورزی است. سهم اقتصادی بخش کشاورزی از کل سه بخش کلان اقتصادی (کشاورزی، صنعت و خدمات) ۲۳ درصد است. سهم اقتصادی سایر بخش‌ها یعنی صنعت و خدمات به ترتیب ۱۷ و ۶۰ درصد است (Input-Output Table of 2016, Central Bank of Iran). سهم اشتغال هر یک از بخش‌های کشاورزی، صنعت و خدمات به ترتیب ۶۰، ۲۰ و ۲۰ درصد است (Force Survey of 2020, Statistical Center of Iran). بررسی سهم‌های اقتصادی و اشتغال حوضه، بیانگر سهم بالای اشتغال با سهم پایین اقتصادی بخش کشاورزی است. اشتغال بالا در بخش کشاورزی با بهره‌وری پایین منجر به استفاده بیشتر از منابع محیطی شده است. هرچند بخش کشاورزی از لحاظ اقتصادی سهم پایینی دارد ولی به دلیل سهم بالای اشتغال، از لحاظ اجتماعی حائز اهمیت است. به‌منظور مدل‌سازی اثرات متقابل عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی از SD با زیرسیستم‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی استفاده شد. در جدول ۱ مآخذ اطلاعات و داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی حوضه در زیرسیستم‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی ارائه شده است.

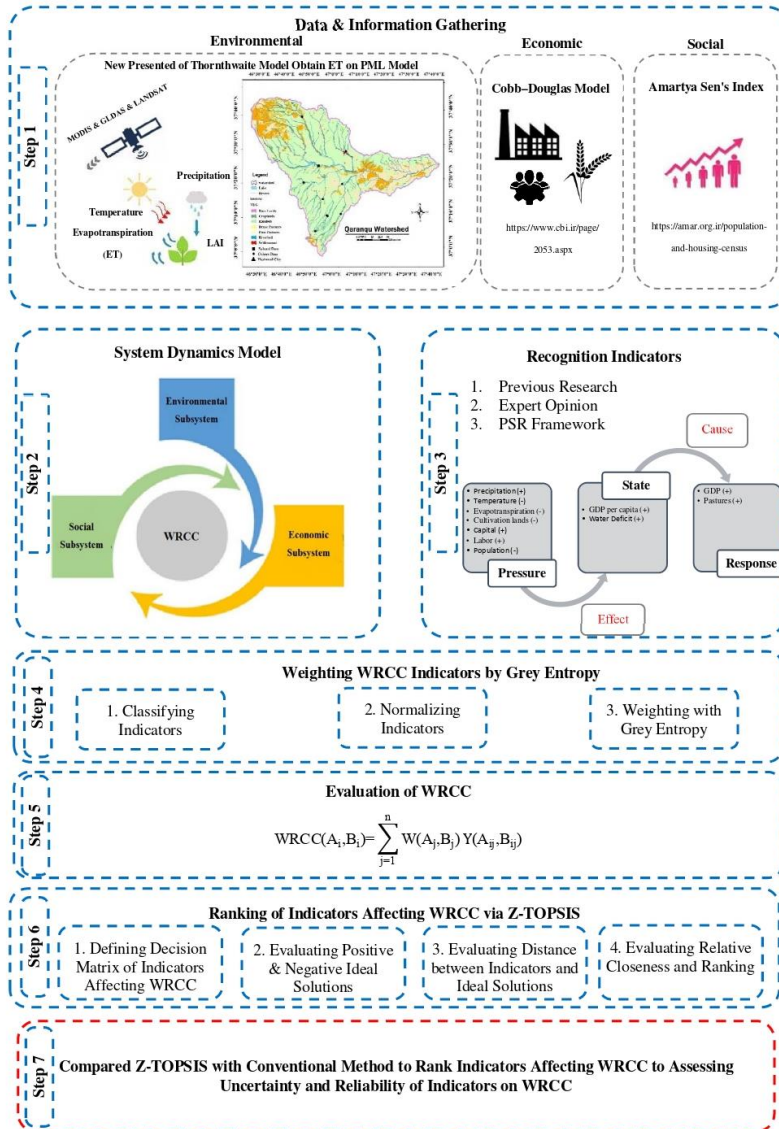


Fig. 1- The overall methodology applied in the paper involves modeling three subsystems (environmental, economic, and social) and determining the indicators affecting WRCC based on the PSR framework and weighting via grey entropy, and ranking based on Z-TOPSIS.

شکل ۱- روش کلی به کار رفته در این مقاله شامل مدل سازی سه زیرسیستم (زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی) و تعیین شاخص های مؤثر بر WRCC بر اساس چارچوب PSR و وزن دهی از طریق آنتروپی خاکستری و رتبه بندی بر اساس Z-TOPSIS است.

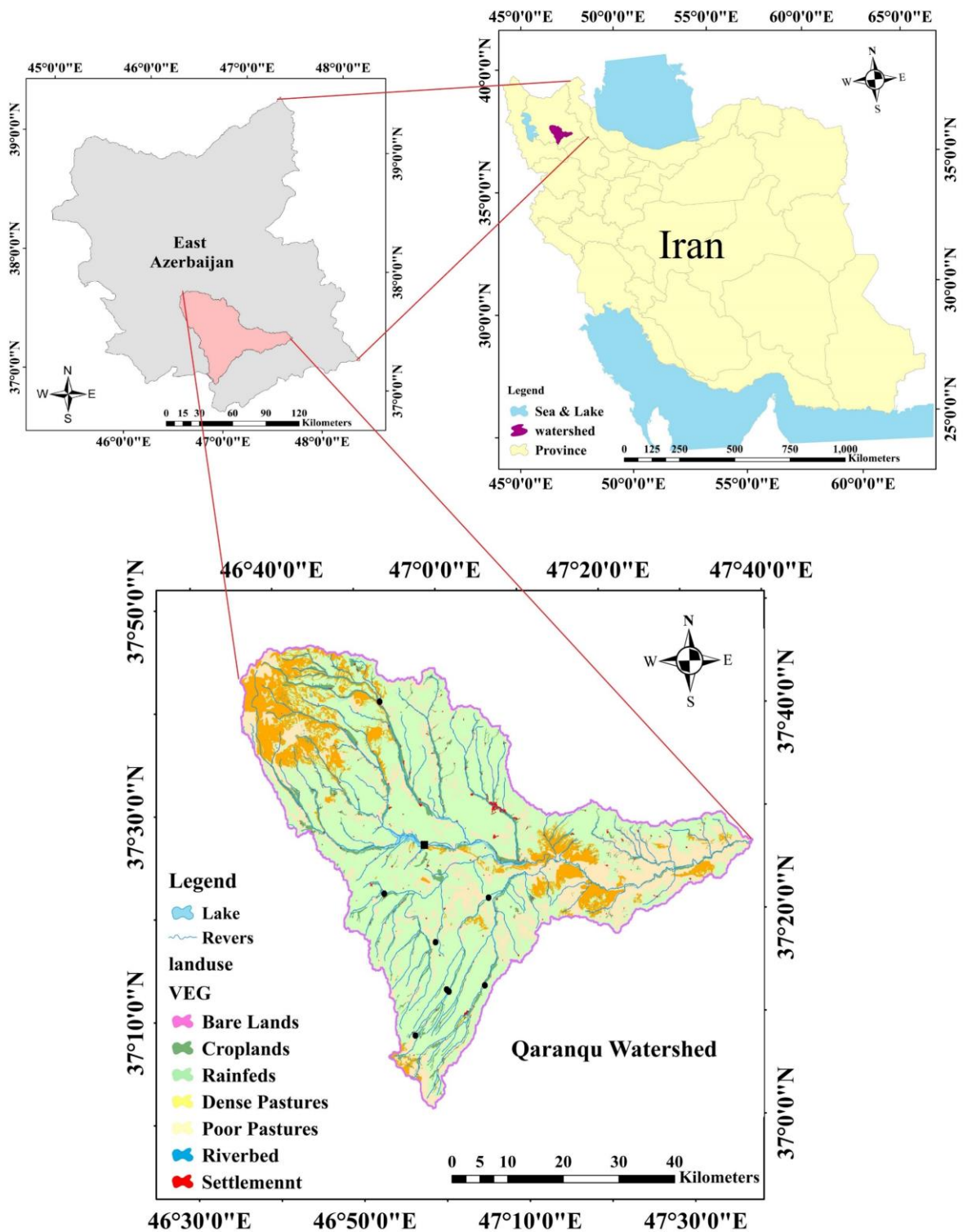


Fig. 2- Qarnqu watershed's geographical location and land use map

شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه قرانقو و کاربری اراضی

Table 1- Data, periods, and sources of information

جدول ۱- داده‌ها، بازه زمانی و منابع اطلاعات

Subsystem	Data	Period	Source
Social	Population		https://amar.org.ir/population-and-housing-census
	Urban population	2000 - 2020	
	Rural population		
Economy	Sector employment	2000 - 2020	https://amar.org.ir/population-and-housing-census
	Capital in the sector	2000 - 2020	https://www.cbi.ir/page/2053.aspx
	Area of the croplands	2000 - 2020	https://amar.org.ir/agri-census
Hydrological	Area of the rainfed	2000 - 2020	https://amar.org.ir/agri-census
	Dam Information	2006	Regional Water Company of East Azerbaijan
	Anthropogenic activity	2020	Base for NDVI from Landsat8
	Evapotranspiration	2000 - 2020	Base for PML model
	Temperature, Precipitation, & Leaf Area Index	2000 - 2020	https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS

(Li et al., 2023b). مدل ذهنی بر اساس روابط علی و معلولی میان پارامترها در نرم‌افزار Vensim برای هریک از زیرسیستم‌ها مدل‌سازی شد. مدل ذهنی ایجادشده در حوضه قرقو توانایی ارزیابی اثرات محیطی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را دارد و همچنین، اثرات اقتصادی تغییرات کاربری اراضی و تغییرات رفاه اجتماعی^{۲۷} ناشی از سرمایه‌گذاری در بخش‌های مختلف اقتصادی (کشاورزی، صنعت و خدمات) حوضه را ارائه می‌کند. به‌منظور بررسی اندرکنش پارامترهای زیرسیستم‌های ایجادشده، دیاگرام انباشت- جریان با استفاده از نرم‌افزار Vensim ایجاد شد و درنهایت مدل ایجادشده صحت‌سنجی شد.

زیرسیستم محیطی

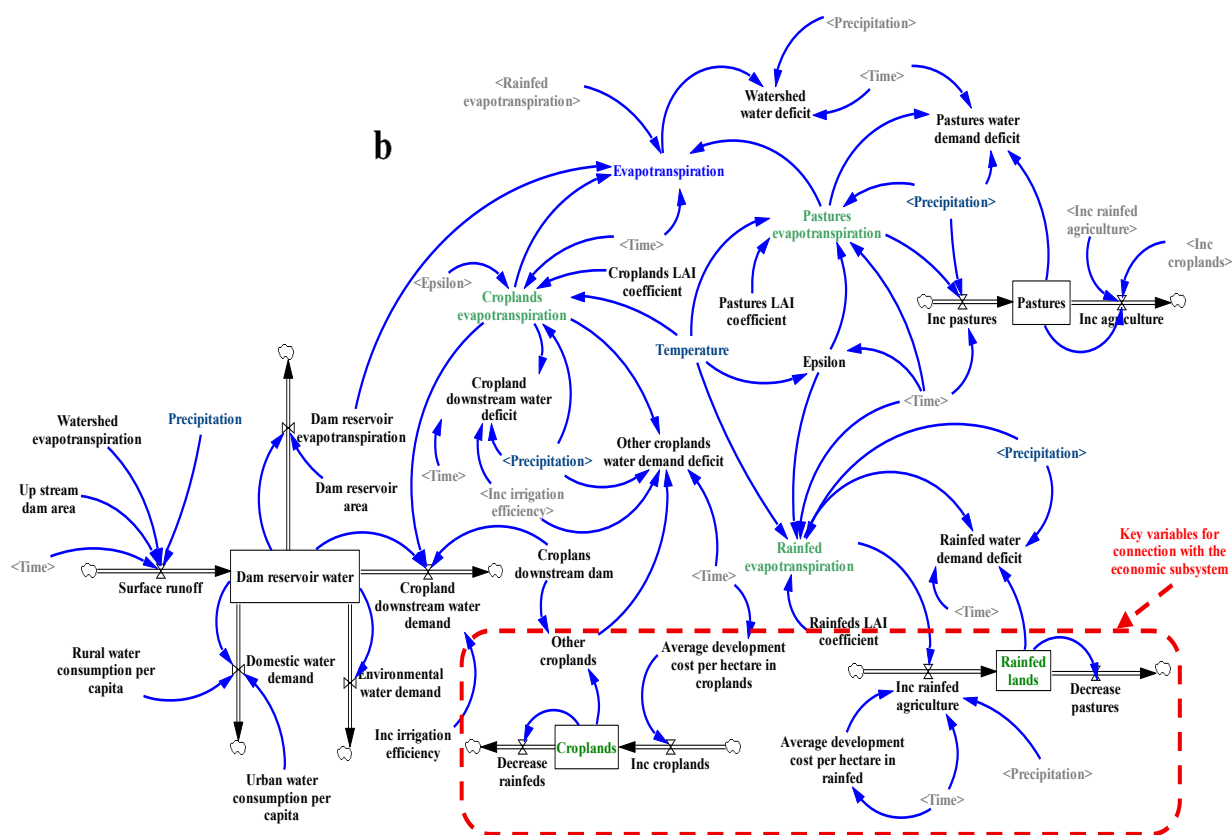
بررسی تغییرات گردش منابع آب در یک حوضه با استفاده از معادله بیلان آب میسر می‌شود برای این منظور از مدل بیلان آب تورنت وایت که با استفاده از حداقل تعداد پارامترها به بیان چرخش آب در حوضه می‌پردازد، استفاده شد. معادله بیلان آب به‌کاربرده شده با استفاده از پارامترهایی نظیر بارش، نفوذ، رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک به بررسی گردش آب در حوضه می‌پردازد. در حوضه

اطلاعات مرتبط با مسائل اقتصادی در درگاه بانک مرکزی ایران تا پایان سال ۲۰۲۰ در دسترس است، بنابراین مدل‌سازی تا پایان سال ۲۰۲۰ انجام شده است.

۳-۲- روش شناسی

۳-۳-۱- ارزیابی پارامترهای WRCC با استفاده از پویایی‌شناسی سیستم (SD)

درک رفتارهای سیستم‌های پیچیده در طول زمان با استفاده از SD قابل بررسی است. مدل SD به دلیل ایجاد حلقه‌های بازخورد، دیاگرام‌های علی- معلولی^{۲۵} و انباشت- جریان^{۲۶} در مطالعه سیستم‌های پیچیده رویکرد متفاوتی نسبت به سایر مدل‌ها دارد. در حوضه مورد مطالعه که توسعه آن متأثر از پیامدهای محیطی، اجتماعی و اقتصادی است گستردگی پارامترهای دخیل، یک سیستم پیچیده ایجاد می‌نماید و نیاز به ایجاد یک مدل مبتنی بر SD مشهود است. همچنین، ایجاد زیرسیستم‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی به‌عنوان مناسب‌ترین تقسیم‌بندی پیشنهاد شد (Phan et al., 2021). پارامترهای هریک از زیرسیستم‌ها بر اساس بیشترین پارامترهای دخیل در ارزیابی WRCC و نظرات خبرگان انتخاب شد



g. 3- Environmental subsystem a) Causal-loop diagram based on mental model stressing the importance of evapotranspiration (ET) and b) Stock-flow diagram based on ET dependent on precipitation, LAI & temperature.

شکل ۳- زیرسیستم محیطی (a) نمودار علی- معلولی بر اساس مدل ذهنی با محوریت تبخیر و تعرق (b) دیاگرام انباشت- جریان بر اساس تغییرات تبخیر و تعرق متأثر از شاخص سطح برگ، دما و بارش

کلاسیک بخش‌های اقتصادی که شامل کشاورزی، صنعت و خدمات است، استفاده شد. به لحاظ اهمیت بخش کشاورزی در حوضه قرقرو پارامتر زمین نقش مهمی در برقراری ارتباط بین زیرسیستم‌ها دارد. دیاگرام انباشت- جریان پارامترهای اقتصادی در سه بخش کلان اقتصادی در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ مدل‌سازی شد (شکل ۴b). متغیرهای کلیدی در زیرسیستم اقتصادی میزان تولید ناخالص داخلی^{۳۰} (GDP) و میزان سرمایه‌گذاری در هر بخش کلان اقتصادی است. شدت تغییر GDP، میزان استفاده از منابع آب، نرخ تغییر جمعیت و میزان رفاه اجتماعی، به سیاست‌های توسعه بخش‌های اقتصادی حوضه وابسته است.

- زیرسیستم اقتصادی

زیرسیستم اقتصادی بر اساس روابط میان متغیرهای دخیل در توسعه اقتصادی ایجاد شد. برای مدل‌سازی اقتصادی از مدل کاب-داگلاس^{۳۹} (Cobb and Douglas, 1928) که در آن عوامل تولید شامل سرمایه، نیروی کار و زمین است، استفاده شد (شکل ۴a). پارامتر زمین نقش مهمی در اشتغال و درآمد جوامع وابسته به بخش کشاورزی دارد؛ لذا حوضه به اراضی کشاورزی آبی، دیم و مرتع تقسیم‌بندی شد تا ارتباط مؤثر این اراضی با مسائل اقتصادی حوضه و همچنین، اثرات تغییرات کاربری اراضی بر میزان آب قابل‌دسترس در حوضه بررسی شود. در زیرسیستم اقتصادی، از تقسیم‌بندی

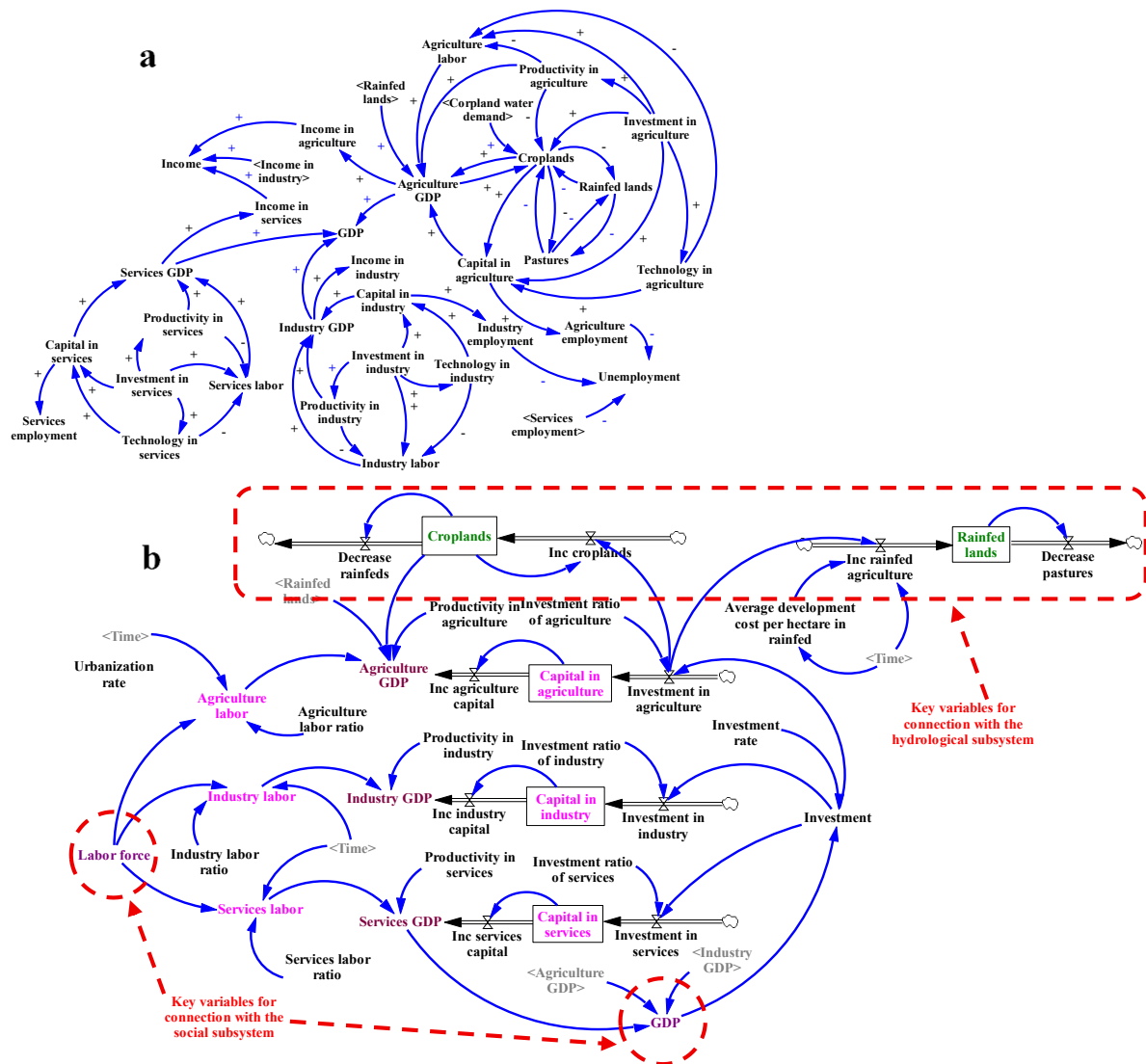


Fig. 4- Economic subsystem a) Causal –loop diagram base on mental model stressing the importance of land use b) Stock-flow diagram that shows relation of land use, capital and labor with GDP

شکل ۴- زیرسیستم اقتصادی (a) نمودار علی - معلولی بر اساس مدل ذهنی با محوریت کاربری اراضی (b) دیاگرام انباشت - جریان بر اساس تغییرات GDP متأثر از کاربری اراضی، سرمایه و نیروی کار

که فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی یا خدماتی در حوضه افزایش می‌یابند، مشاغل مرتبط با بخش‌ها از یک سو و تقاضای نیروی کار و نسبت شغل به شاغل در هر بخش از سوی دیگر افزایش می‌یابند. با رشد تقاضای نیروی کار، افراد بیشتری برای اشتغال در بخش‌های اقتصادی وارد حوضه می‌شوند. روند افزایش اشتغال بالأخص در بخش کشاورزی بر مسائل محیطی از جمله منابع آب فشار مضاعف دارد.

زیرسیستم اجتماعی

در مدل ذهنی پارامترهای متعددی در بیان زیرسیستم اجتماعی لحاظ شد که اغلب این پارامترها کیفی هستند (شکل ۵a). برای کمی‌سازی زیرسیستم اجتماعی در راستای اهداف توسعه پایدار پویایی‌های جمعیتی و تغییرات رفاه اجتماعی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵b). برای بررسی متغیرهای دخیل در رفاه اجتماعی از شاخص سن^{۳۱} استفاده شد (Sen, 1974). تغییرات رشد GDP بر روابط متغیرهای زیرسیستم اجتماعی تأثیر می‌گذارند. همچنان

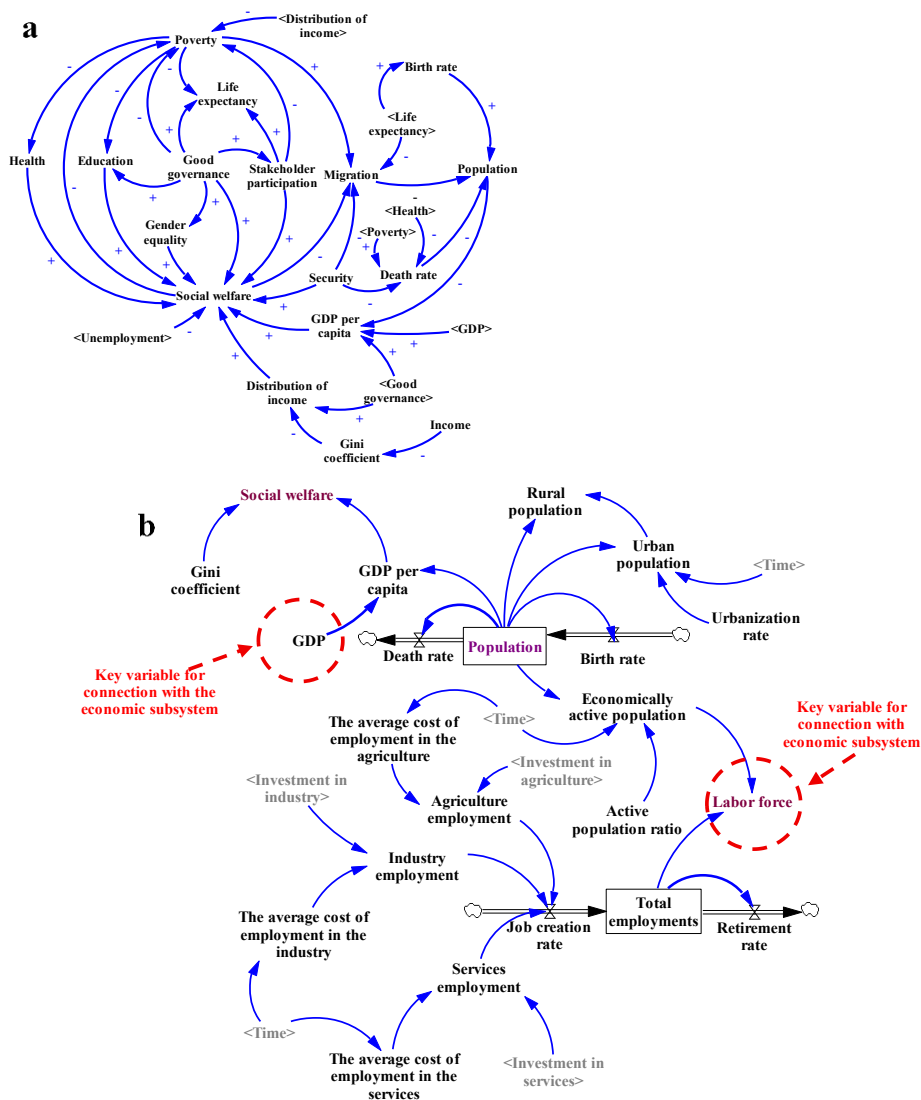


Fig. 5- Social subsystem a) Causal –loop diagram base on mental model that shows the importance of good b) Stock-flow diagram that shows the importance of population governance

شکل ۵- زیرسیستم اجتماعی (a) نمودار علی- معلولی بر اساس مدل ذهنی با محوریت حکمرانی خوب (b) دیاگرام انباشت- جریان بر اساس تغییرات جمعیت

اراضی زیر کشت میزان GDP افزایش یافته و باعث افزایش میزان سرمایه‌گذاری می‌شود. بخشی از افزایش میزان سرمایه‌گذاری به بخش کشاورزی هدایت شده و منجر به افزایش مجدد GDP می‌شود. این حلقه بازخورد در زیرسیستم اقتصادی به‌عنوان یکی از حلقه‌های غالب بوده و نقش تشدید بازخورد را دارد. با افزایش GDP در حوضه میزان رفاه اجتماعی افزایش یافته و باعث مهاجرت به سمت حوضه و افزایش جمعیت می‌شود و به تبع آن درخواست برای کار افزایش یافته و وجود نیروی کار مؤثر به‌عنوان یکی از عوامل توسعه اقتصادی باعث افزایش GDP می‌شود. این حلقه بازخورد در زیرسیستم اجتماعی به‌عنوان یکی از حلقه‌های غالب بوده و نقش

ارتباط زیرسیستم‌های طراحی شده با استفاده از پارامترهای کلیدی برقرار شد. برخی از این پارامترها در بخش‌بندی عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی حوضه می‌توانند در چند زیرسیستم نقش داشته باشند. پارامتر زمین ارتباط بین زیرسیستم محیطی و اقتصادی را برقرار می‌نماید. پارامترهای GDP و نیروی کار ارتباط بین زیرسیستم اقتصادی و اجتماعی را برقرار می‌نمایند. با افزایش سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی، اراضی بیشتری زیر کشت قرار می‌گیرند که باعث افزایش میزان تبخیر و تعرق و کاهش آب در دسترس حوضه خواهد شد، این حلقه بازخورد در زیرسیستم محیطی به‌عنوان یکی از حلقه‌های غالب بوده و نقش کنترلی دارد. با افزایش

تشدید بازخورد را دارد. تغییرات حلقه‌های بازخورد غالب در زیرسیستم‌ها از طریق پارامترهای کلیدی در یکدیگر اثرگذارند. این مدل‌سازی برای بازه زمانی ۲۰ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ انجام شد، تا بتواند روند مناسبی از تغییرات در حوضه بر اساس پارامترهای لحاظ شده ارائه نماید.

۲-۳-۲- چارچوب فشار- وضعیت- پاسخ PSR در شناسایی پارامترهای مؤثر بر WRCC

WRCC تحت تأثیر طیف گسترده‌ای از عوامل است. روش‌های ارزیابی مبتنی بر شاخص ابزار مفیدی برای این نوع ارزیابی هستند (Yang et al., 2015)؛ اما هنوز چالش‌های جدی در ارزیابی‌های مبتنی بر شاخص وجود دارد (Wu and Hu, 2020). تکنیک نیروی محرک- فشار- وضعیت- بازخورد- پاسخ^{۳۲} (DPSIR) یک چارچوب ساختاریافته برای تحلیل علل (محرک‌ها)، اثرات (تأثیرات) و پاسخ‌ها در یک اکوسیستم را فراهم می‌کند (Wang et al., 2021b; Yang et al., 2025). چارچوب DPSIR به دلیل داشتن دسته‌های شاخص بسیار زیاد ممکن است تأثیر شاخص‌های کلیدی را تضعیف کند و یا ممکن است با استفاده از این چارچوب شاخص‌هایی انتخاب شوند که تأثیر کم و یا نامشخصی بر WRCC دارند (Yang et al., 2015). در این پژوهش از چارچوب فشار- وضعیت- پاسخ (PSR) جهت انتخاب شاخص‌های ارزیابی استفاده شده است. برای درک بهتر پویایی تکنیک PSR، لازم است بر روابط بین عناصر آن تمرکز شود. در مطالعات منابع آب، ارتباطات بین عناصر PSR به این صورت توصیف می‌شود: "چه چیزی در بخش آب بررسی می‌شود یا رخ داده است؟" در تکنیک PSR، این سؤال از طریق شاخص‌های وضعیت (S) نشان داده می‌شود که چالش اصلی در مورد وضعیت سیستم- موضوعی که تحت تأثیر عوامل دیگر قرار دارد- را برجسته می‌کند. با تحلیل پارامترها در چارچوب SD، شاخص‌های مناسب برای وضعیت و تأثیر، از جمله سرانه تولید ناخالص داخلی و کسری آب در حوضه شناسایی شدند. این‌ها به‌عنوان نکات کلیدی ارزیابی در این سیستم پیچیده عمل می‌کنند و به‌عنوان هسته اصلی مفهوم WRCC عمل می‌کنند. تأثیرات و وضعیت سیستم تا حدودی مکمل یکدیگر هستند؛ اگر وضعیت (S) مستقیماً از فشارها (P) ناشی شود، آنگاه تأثیر (R) به‌عنوان یک پیامد یا اثر غیرمستقیم در نظر گرفته می‌شود (Shao et al., 2014). تجزیه و تحلیل بیشتر "چرا اتفاق افتاده است" برای ارزیابی بسیار مهم است. درک دلایل یک رویداد برای هدایت

مدیریت سیستم ضروری است و نیاز به جمع‌آوری اطلاعات مرتبط در مورد سیستم دارد. در تکنیک PSR، چرایی وقوع آن را می‌توان از طریق فشارها (P) شناسایی کرد. در مدل SD، پارامترهایی مانند تغییرات اقلیمی، جمعیت، سرمایه، نیروی کار، زمین‌های کشاورزی و تبخیر و تعرق به‌عنوان شاخص‌های فشارها شناخته شدند. تأثیر فشارها (P) بر وضعیت (S) آشکار است. با این وجود، ارتباط بین فشارها و وضعیت، مستقیم و مشهود است و بینش‌هایی را در مورد دلایل شرایط فعلی فراهم می‌کند (Shao et al., 2014). پس از درک چرایی وجود وضعیت، تجزیه و تحلیل بیشتر برای تعیین چگونگی رسیدگی به آن موردنیاز است. در مجموع، هدف، بهبود وضعیت سیستم با کاهش اثرات منفی است. لذا شاخص‌ها بر اساس نقش مؤثر آن‌ها در زیرسیستم‌ها، چارچوب PSR، نظرات خبرگان و همچنین، بر اساس مطالعات پیشین (Li et al., 2023)، استخراج شد که در جدول ۲ ارائه شده است. برخی از شاخص‌های جدول ۲ به دلیل نوع مدل‌های استفاده شده در هر زیرسیستم، نقش مشترک در زیرسیستم‌ها دارند و این اشتراک، درهم تنیدگی مسائل مرتبط با مسائل آب در یک حوضه را نشان می‌دهد. به‌طور نمونه شاخص توسعه اراضی زیر کشت به‌عنوان نشانگر تغییرات کاربری اراضی در دو زیرسیستم محیطی و اقتصادی و شاخص نیروی کار در دو زیرسیستم اقتصادی و اجتماعی ملاحظه می‌شوند. شاخص‌های مؤثر ماهیتی مثبت یا معکوس در فهم از WRCC ارائه می‌کنند. ماهیت هر شاخص بر اساس مثبت و معکوس بودن در جدول ۲ ارائه شده است.

Table 2- Resulted indicators for evaluation of water resources carrying capacity (WRCC)

جدول ۲- شاخص‌های استخراج‌شده برای محاسبه ظرفیت برد منابع آب

Target	System-level	Evaluation indicator	Unit	Framework Layer	Attribute
WRCC	Environmental subsystem	Precipitation	mm/Year	Pressure	Positive
		Temperature	°C	Pressure	Reverse
		Evapotranspiration	mm/Year	Pressure	Reverse
		Water Deficit	Million M ³ /Year	State	Positive
		Pastures	Hectare	Response	Positive
		Cultivation lands	Hectare	Pressure	Reverse
	Economical subsystem	GDP	Millions of Rials	Response	Positive
		Capital	Million Rials	Pressure	Positive
		Labor	People	Pressure	Positive
	Social subsystem	GDP per capita	Millions of Rials /	State	Positive
		Population	People	Pressure	Reverse

منعکس‌کننده میزان عدم قطعیت باشد. عدم قطعیت نتیجه دانش ناقص یا تغییرپذیری ذاتی در سیستم است (IPCC AR5, 2014). مدل‌سازی عدم قطعیت یکی از اساسی‌ترین مشکلات سیستم‌ها است. روش‌های زیادی برای این منظور معرفی شده‌اند که تفاوت عمده آن‌ها در بیان عدم قطعیت پارامترهای ورودی سیستم است. منطق فازی (Zadeh, 1965) از توابع عضویت فازی، احتمالات از توابع چگالی احتمال و تئوری خاکستری (Ju-Long, 1982) از بازه برای بیان عدم قطعیت سیستم بهره می‌برند، وجه تشابه آن‌ها تعیین اثر ورودی بر خروجی سیستم‌ها است. تئوری خاکستری بدون در نظر داشتن تابع عضویت و بر اساس محدوده اطلاعات در دسترس نیز به خوبی عمل می‌نماید. لذا اعمال مفهوم اعداد خاکستری بر شاخص‌های مؤثر بر WRCC می‌تواند بخشی از عدم قطعیت در برآورد و ناهم‌جنس بودن داده‌ها را پوشش دهد. شاخص‌های مؤثر بر WRCC دارای ماهیت‌های مثبت و معکوس هستند ابتدا نسبت به نرمال‌سازی شاخص‌های مثبت بر اساس رابطه ۱ و شاخص‌های معکوس بر اساس رابطه ۲ اقدام شد.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad j = 1, \dots, m \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad j = 1, \dots, m \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

در این روابط y_{ij} شاخص نرمال شده در سال i مقدار x_{ij} مقدار شاخص j در سال i $\min(x_{ij})$ حداقل مقدار شاخص‌های j در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ و $\max(x_{ij})$ حداکثر مقدار شاخص‌های j در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است. مقادیر شاخص‌های نرمال شده در پنج کلاس بر اساس جدول ۳ کلاس‌بندی شد و ماتریس خاکستری از اعداد

هرچند در مدل‌سازی SD اطلاعات به صورت داده‌های قطعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند ولی به دلیل محدودیت در استخراج داده‌ها، دامنه مقدار برای هر یک از پارامترها، تعداد پارامترها، ناهم‌جنسی پارامترها و استفاده از حداقل پارامترها برای ارزیابی، مدل با عدم قطعیت و قابلیت اطمینان همراه است. لذا استفاده از تئوری‌هایی که توان بیان عدم قطعیت را دارند راهکارهای جدیدی در تشریح و تحلیل شرایط و اثرات پارامترها می‌توانند ارائه نمایند.

۲-۳-۳- وزن‌دهی بر اساس آنتروپی خاکستری

مسائل تصمیم‌گیری، اغلب با موقعیت‌های غیرقطعی، فقدان اطلاعات دقیق، و ارزیابی‌های زبان‌شناختی ارائه‌شده به وسیله کارشناسان مواجه هست. در بسیاری موارد، اجبار تصمیم‌گیرندگان به ارائه ارزیابی عددی با استفاده از تصورات ذهنی‌شان غیرمنطقی است و واقع‌بینانه‌تر آن است که تصمیم‌گیرندگان با ابزاری از اصطلاحات زبان‌شناختی برای معرفی مقادیر رتبه‌بندی و اهمیت نسبی معیارهای موردنظر استفاده نمایند (Wang et al., 2020). روش وزن‌دهی آنتروپی یک روش وزن‌دهی عینی است که می‌تواند با مقایسه مقدار آنتروپی برای هر معیار، اهمیت نسبی را در بین همه معیارها محاسبه کند (Keshavarz-Ghorabae et al., 2021). با این حال، برای تجزیه و تحلیل وزن، روش آنتروپی سنتی مبتنی بر نوع پیوسته آنتروپی برای رسیدن به یک مسئله عملی با داده‌های گسسته مناسب نیست (Wen et al., 1998). برای غلبه بر این مسئله شیوه‌ای از آنتروپی خاکستری، بر اساس نوع گسسته آنتروپی پیشنهاد شد تا به درستی تجزیه و تحلیل وزن‌دهی انجام شود (Lotfi and Fallahnejad, 2010). تئوری سیستم‌های خاکستری داده‌ها را به صورت بازه‌ای نمایش می‌دهد که عرض بازه می‌تواند

خاکستری که در آن هر کلاس بیانگر یک عبارت کلامی است تشکیل شد. همچنین، برای بیان قابلیت اطمینان شاخص‌های

ماتریس خاکستری، بر اساس فراوانی هر متغیر زبانی در هر شاخص، از متغیرهای کلامی جدول ۳ در سه کلاس استفاده شد.

Table 3- Indicators and their reliability classified based on grey theory
جدول ۳- کلاس‌بندی مقدار و قابلیت اطمینان شاخص‌ها بر مبنای تئوری خاکستری

Linguistic variable	Grey Interval	Symbol	Linguistic variable	Grey Interval	Symbol
Very Low	[0.00 0.20]	VL	Weak	[0.00 0.33]	W
Low	[0.20 0.40]	L	Fairly	[0.33 0.67]	F
Medium	[0.40 0.60]	M	Strong	[0.67 1.00]	S
High	[0.60 0.80]	H			
Very High	[0.80 1.00]	VH			

$$\begin{aligned}
 & -h(A_0, B_0) \sum_{i=1}^n p(A_{ij}^l, B_{ij}^l) \cdot \ln p(A_{ij}^l, B_{ij}^l), \\
 & -h(A_0, B_0) \sum_{i=1}^n p(A_{ij}^u, B_{ij}^u) \cdot \ln p(A_{ij}^u, B_{ij}^u) \} \\
 & j=1, \dots, m \\
 & h(A_j^u, B_j^u) = \max \{ \\
 & -h(A_0, B_0) \sum_{i=1}^n p(A_{ij}^l, B_{ij}^l) \cdot \ln p(A_{ij}^l, B_{ij}^l), \\
 & -h(A_0, B_0) \sum_{i=1}^n p(A_{ij}^u, B_{ij}^u) \cdot \ln p(A_{ij}^u, B_{ij}^u) \} \quad (5) \\
 & j=1, \dots, m
 \end{aligned}$$

$h(A_j^l, B_j^l)$ آنتروپی مقدار و قابلیت اطمینان کران پایین هر شاخص و $h(A_j^u, B_j^u)$ آنتروپی مقدار و قابلیت اطمینان کران بالای هر شاخص است. $h(A_0, B_0)$ ثابت آنتروپی است که از رابطه $(\ln m)^{-1}$ محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از مفهوم فاصله، درجه انحراف کران پایین هر مؤلفه هر شاخص $d(A_j^l, B_j^l)$ درجه انحراف کران بالای هر مؤلفه هر شاخص $d(A_j^u, B_j^u)$ از روابط ۶ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}
 d(A_j^l, B_j^l) &= 1 - h(A_j^u, B_j^u) \\
 d(A_j^u, B_j^u) &= 1 - h(A_j^l, B_j^l) \\
 j &= 1, \dots, m
 \end{aligned} \quad (6)$$

در گام بعدی وزن کران بالا $w(A_j^u, B_j^u)$ و پایین $w(A_j^l, B_j^l)$ هر مؤلفه هر شاخص بر اساس روابط ۷ به دست می‌آید.

برای وزن دهی شاخص‌های مؤثر بر WRCC در بازه ۲۰۰۰-۲۰۲۰ که دارای مؤلفه عدم قطعیت (A) به شکل عدد خاکستری و همچنین، مؤلفه قابلیت اطمینان (B) به شکل عدد خاکستری هستند از آنتروپی خاکستری استفاده شد. برای شاخص‌های نرمال سازی شده با ویژگی ذکر شده در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ ماتریس تصمیم نرمال داده‌ها با قابلیت اطمینان به صورت ($Y = [y(A_{ij}, B_{ij})]_{n \times m}$ $j=1, \dots, m; i=1, \dots, n$) ایجاد شد. ماتریس حاصل ماتریس تصمیم خاکستری است. در ماتریس (B_{ij}) به‌عنوان یک عدد خاکستری، مؤلفه اول بیانگر مقدار (A) و مؤلفه دوم بیانگر قابلیت اطمینان (B) شاخص j است و i بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است. نرمال سازی کران بالا و پایین هر مؤلفه هر شاخص ماتریس تصمیم خاکستری با استفاده از رابطه ۳ انجام می‌پذیرد.

$$\begin{aligned}
 p(A_{ij}^l, B_{ij}^l) &= \frac{y(A_{ij}^l, B_{ij}^l)}{\sum_{j=1}^m y(A_{ij}^u, B_{ij}^u)} \\
 p(A_{ij}^u, B_{ij}^u) &= \frac{y(A_{ij}^u, B_{ij}^u)}{\sum_{j=1}^m y(A_{ij}^l, B_{ij}^l)} \\
 j &= 1, \dots, m; i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \quad (3)$$

$y(A_{ij}^l, B_{ij}^l)$ مقدار و قابلیت اطمینان کران پایین شاخص $y(A_{ij}^u, B_{ij}^u)$ ، $y(A_{ij}^l, B_{ij}^l)$ مقدار و قابلیت اطمینان کران پایین شاخص $y(A_{ij}^u, B_{ij}^u)$ ، $y(A_{ij}^l, B_{ij}^l)$ مقدار و قابلیت اطمینان کران بالای شاخص $y(A_{ij}^u, B_{ij}^u)$ و $y(A_{ij}^l, B_{ij}^l)$ مقدار و قابلیت اطمینان کران بالای شاخص $y(A_{ij}^u, B_{ij}^u)$ است. در گام بعدی آنتروپی کران بالا و پایین هر مؤلفه هر یک از کلاس‌ها بر اساس روابط ۴ و ۵ برای هر مؤلفه هر شاخص محاسبه می‌شود.

$$h(A_j^l, B_j^l) = \min \{ \quad (4)$$

اقتصادی و اجتماعی می‌تواند مناسب باشد. همچنین، این شاخص می‌بایست در کنار بیان یک مسئله پیچیده دارای سادگی محاسباتی باشد. لذا استفاده از یک شاخص ترکیبی که بتواند لایه‌های متفاوت پیچیدگی WRCC را بیان نماید قابل استفاده است (Wang et al., 2022). برای تعیین WRCC، با استفاده از شاخص‌های مؤثر، ابتدا باید مقدار WRCC و قابلیت اطمینان آن استاندارد شود. مقادیر استاندارد مقدار و قابلیت اطمینان WRCC به همراه نمادها در پنج کلاس در جدول ۴ ارائه شده است. WRCC را می‌توان از طریق تابع وزن‌دهی، رابطه ۹ به دست آورد.

$$WRCC(A_i, B_i) = \sum_{j=1}^n W(A_j, B_j) Y(A_{ij}, B_{ij}) \quad (9)$$

در این رابطه $WRCC(A_i, B_i)$ شاخص ارزیابی ظرفیت برد منابع آب با قابلیت اطمینان در سال i ، $W(A_j, B_j)$ وزن شاخص Z به همراه قابلیت اطمینان و $Y(A_{ij}, B_{ij})$ مقدار شاخص Z با قابلیت اطمینان آن در سال i است. در این مطالعه وضعیت WRCC به پنج کلاس تقسیم شده است تا تحلیل شهودی از وضعیت حوضه در طی سال‌های سپری شده ارائه شود (Wang et al., 2022).

$$w(A_j^l, B_j^l) = \frac{d(A_j^l, B_j^l)}{\sum_{s=1}^n d(A_s^l, B_s^l)} \quad j=1, \dots, m \quad (7)$$

$$w(A_j^u, B_j^u) = \frac{d(A_j^u, B_j^u)}{\sum_{s=1}^n d(A_s^u, B_s^u)}$$

در نهایت وزن هر مؤلفه شاخص با استفاده از وزن کران بالا و پایین هر مؤلفه هر شاخص، از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$W(A_j, B_j) = \frac{w(A_j^l, B_j^l) + w(A_j^u, B_j^u)}{2} \quad j=1, \dots, m \quad (8)$$

وزن هر مؤلفه هر شاخص شامل وزن مقدار و وزن قابلیت اطمینان هر شاخص است و برای شاخص‌های استخراج شده بر اساس مدل توسعه داده شده در جدول ۵ ارائه شده است.

۲-۳-۴- ظرفیت برد منابع آب (WRCC)

در حال حاضر هیچ سیستم شاخص ارزیابی WRCC واحدی وجود ندارد که بتوان آن را برای تمامی حوضه‌ها اعمال نمود (Li et al., 2023a). لذا ایجاد یک شاخص به هم پیوسته از مسائل محیطی،

Table 4- Classified WRCC criteria and its reliability
جدول ۴- کلاس بندی مقدار و قابلیت اطمینان ظرفیت برد منابع آب

WRCC value	0.00-0.20	0.20-0.40	0.40-0.60	0.60-0.80	0.80-1.00
WRCC status	Very poor (VP)	Poor (P)	Normal (N)	Good (G)	Excellent (E)
WRCC reliability value	0.00-0.33		0.33-0.67		0.67-1.00
WRCC reliability	Weak (W)		Fairly (F)		Strong (S)

TOPSIS مبتنی بر تئوری فازی شده است (Zyoud et al., 2016). در توسعه درک عدم قطعیت با استفاده از تئوری فازی، مفهوم اعداد Z که توانایی هم‌زمان عدم قطعیت و عدم دقت اطلاعات را دارد، ارائه شد (Zadeh, 2011). اعداد Z به شکل $Z=(A, B)$ دارای دو مؤلفه است مؤلفه اول عدم قطعیت بر روی متغیر تصادفی X و مؤلفه دوم قابلیت اطمینان مؤلفه اول را نشان می‌دهد. این قابلیت اطمینان را می‌توان از نقطه نظرات مختلف از جمله: احتمال، اعتبار، اطمینان مورد بررسی قرار داد. اجزای اعداد Z اغلب توسط دانش فرد خبره تعیین می‌شوند و فاقد یادگیری هستند. لذا اعداد Z انعطاف پذیری مدل اصلی را از نظر زبانی حفظ می‌کنند. با ادغام اعداد Z در روش TOPSIS می‌توان از قابلیت اطمینان عدم قطعیت داده‌ها در رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده نمود. در روش پیشنهادی این تحقیق، متغیرهای زبانی بر اساس

به‌طور کلی، WRCC بزرگ‌تر به این معنی است که منابع آب حوضه می‌تواند پشتیبانی قوی‌تری برای فعالیت‌های مختلف انسانی ارائه دهد. از آنجایی که شاخص ارزیابی نشان‌دهنده ظرفیت برد نسبی است، این روش می‌تواند روند توسعه WRCC را منعکس کند (Liu et al., 2022).

۲-۳-۵- زد- تاپسیس (Z-TOPSIS)

TOPSIS یک روش جهت ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌ها، با توجه به فاصله آن‌ها از ایده‌آل‌های مثبت و منفی است. از مزیت‌هایی این روش نسبت به سایر روش‌های رتبه‌بندی گزینه‌ها، آن است که شاخص‌های به کار رفته برای مقایسه به‌طور هم‌زمان می‌توانند کمی یا کیفی بوده و طبیعت معکوس یا مثبت داشته باشند. عدم قطعیت پارامترها و روش‌های ارزیابی گزینه‌ها منجر به ایجاد تکنیک

$$\begin{aligned} & \& d(B_1, B_2) \\ & = \sup\{d_H(B_1^\alpha, B_2^\alpha) | 0 < \alpha \leq 1\} \\ \text{Where } d_H \text{ is fuzzy Hasdroff distance,} \\ d_H(A_1, A_2) & = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha d_H^\alpha(A_1, A_2) \& \\ d_H(B_1, B_2) & = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha d_H^\alpha(B_1, B_2) \end{aligned}$$

Where U indicates the unioins of sets.

$$\begin{aligned} DT_i^+ & = \sqrt{\sum_{j=1}^n (D(Z_{Pj}^{id}, Z_{ij}))^2} \quad \& \\ DT_i^- & = \sqrt{\sum_{j=1}^n (D(Z_{Nj}^{id}, Z_{ij}))^2} \quad ; i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$

Z $D(Z_1, Z_2)$ فاصله بین کلاس مقدار و قابلیت اطمینان دو عدد Z است. DT_i^+ فاصله نهایی از گزینه ایده‌آل مثبت و DT_i^- فاصله نهایی از گزینه ایده‌آل منفی است. گام نهائی محاسبه گزینه ایده‌آل است. در این گام میزان نزدیکی نسبی هر گزینه به گزینه ایده‌آل از رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$RC_i = \frac{DT_i^-}{DT_i^+ + DT_i^-} \quad (14)$$

مقدار RC بین صفر و یک تغییر می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد گزینه به جواب ایده‌آل نزدیک‌تر و گزینه بهتری است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- ظرفیت برد منابع آب حوضه

پارامترهای متعددی توسط SD در قالب سه زیرسیستم محیطی، اقتصادی و اجتماعی در حوضه قرقو مدل‌سازی شد و شاخص‌های مؤثر بر $WRCC$ به استناد مطالعات قبلی، دانش خبرگان و تکنیک PSR شناسایی شده و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. از یازده شاخص شناسایی شده، شاخص‌های دما، توسعه اراضی کشاورزی، جمعیت، تبخیر و تعرق بر مفهوم $WRCC$ اثر معکوس دارند. با استفاده از مدل SD مقادیر کمی یازده شاخص مؤثر بر $WRCC$ در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰ تهیه شد و با استفاده از مفهوم آنتروپی، تئوری خاکستری و قابلیت اطمینان شاخص‌های مؤثر وزن‌دهی شدند. محاسبه قابلیت اطمینان شاخص‌های مؤثر بر $WRCC$ با استفاده از تبدیل مقادیر شاخص‌ها به متغیر زبانی بر اساس جدول ۳ و بررسی فراوانی تکرار متغیرهای زبانی شاخص‌ها در بازه ۲۰۲۰-

اعداد Z به‌طور مستقیم برای تصمیم‌گیری و فاصله هاسدورف فازی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل، استفاده شد. اطلاعات بدون محدودیت در نوع اعداد فازی به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد و توانایی فاصله هاسدورف فازی، به لحاظ نظری و عملی در برخی کاربردهای قبلی مانند تصمیم‌گیری و تشخیص الگو تأیید شده است (Nourani and Najafi, 2023). ابتدا ماتریس تصمیم فازی $WRCC$ در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ بر اساس شاخص‌ها با مؤلفه‌های فازی مقدار و قابلیت اطمینان هر شاخص ایجاد می‌شود. شاخص‌ها بر اساس روابط ۱ و ۲ نرمال شده و علاوه بر این، به دلیل وزن متفاوت هر شاخص در $WRCC$ ، ماتریس نرمال شده با اعمال وزن هر شاخص به ماتریس تصمیم نرمال شده وزنی، تبدیل شده و ماتریس تصمیم نرمال شده وزنی به صورت $(Z = [z(A_{ij}, B_{ij})]_{n \times m} \quad j=1, \dots, m; i=1, \dots, n$ تشکیل می‌شود. در این رابطه $z(A_{ij}, B_{ij})$ به‌عنوان یک عدد Z بیانگر مقدار فازی (A) و قابلیت اطمینان فازی (B) شاخص Z در سال i است. در گام بعدی برای هر شاخص، گزینه ایده‌آل مثبت \tilde{R}_p^{id} و گزینه ایده‌آل منفی \tilde{R}_N^{id} از طریق بخش اول روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود. برای شاخص‌هایی که ماهیت مثبت دارند ایده‌آل مثبت بزرگ‌ترین مقدار آن معیار بوده و از بخش دوم رابطه ۱۰ محاسبه شده و ایده‌آل منفی کوچک‌ترین مقدار آن معیار بوده و از بخش دوم رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود. همچنین، برای معیارهایی که ماهیت معکوس دارند ایده‌آل مثبت کوچک‌ترین مقدار آن معیار بوده و از بخش دوم رابطه ۱۱ محاسبه و ایده‌آل منفی بزرگ‌ترین مقدار آن معیار بوده و از بخش دوم رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_p^{id} & = \{Z(A_{p1}^{id}, B_{p1}^{id}), Z(A_{p2}^{id}, B_{p2}^{id}), \dots, Z(A_{pn}^{id}, B_{pn}^{id})\} \\ & \text{where } Z(A_{pj}^{id}, B_{pj}^{id}) = \max_{i=1, \dots, m} (\tilde{Z}_{ij}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{R}_N^{id} & = \{Z(A_{N1}^{id}, B_{N1}^{id}), Z(A_{N2}^{id}, B_{N2}^{id}), \dots, Z(A_{Nn}^{id}, B_{Nn}^{id})\} \\ & \text{where } Z(A_{Nj}^{id}, B_{Nj}^{id}) = \min_{i=1, \dots, m} (\tilde{Z}_{ij}) \end{aligned} \quad (11)$$

سپس فاصله هاسدورف بین ویژگی‌های شاخص‌ها و گزینه ایده‌آل (مثبت و منفی) محاسبه می‌شود. فاصله هاسدورف فازی برای محاسبه فاصله بین اعداد Z استفاده می‌شود (Nourani and Najafi, 2023) را مطالعه نمایید). فاصله هاسدورف فازی با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} (Z_1, Z_2) & = d(A_1, A_2) + d(B_1, B_2) \text{ Where,} \\ d(A_1, A_2) & = \sup\{d_H(A_1^\alpha, A_2^\alpha) | 0 < \alpha \leq 1\} \end{aligned} \quad (12)$$

۲۰۰۰ میسر شد. مقادیر محاسبه شده برای وزن هر یک از شاخص‌ها در قالب اعداد خاکستری شامل دو جزء هستند که اولی بیانگر وزن

شاخص‌ها و دومی وزن قابلیت اطمینان هر شاخص در محاسبه WRCC است که در جدول ۵ ارائه شده است.

Table 5- Weights of indicators' values and reliabilities
جدول ۵- وزن مقدار و قابلیت اطمینان شاخص‌ها

Evaluation indicator	Indicator's Weight	Indicator's Reliability Weight
Precipitation	0.067	0.078
Temperature	0.086	0.080
Evapotranspiration	0.090	0.095
Water Deficit	0.059	0.079
Pastures	0.079	0.095
Cultivation lands	0.079	0.095
GDP	0.107	0.105
Capital	0.118	0.086
Labor	0.118	0.073
GDP per capita	0.107	0.106
Population	0.090	0.108

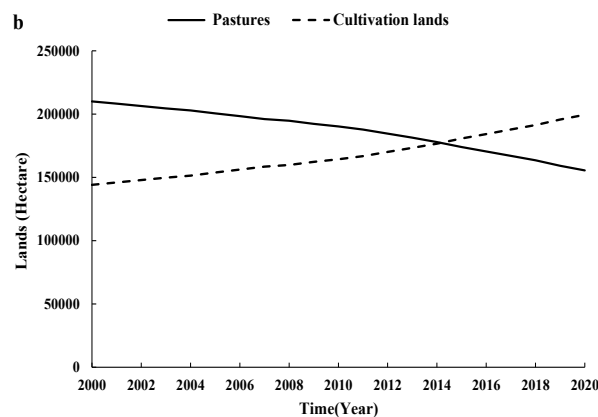
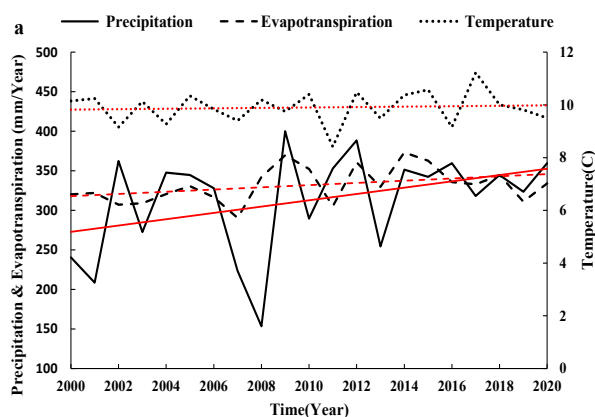
با استفاده از وزن مقدار و قابلیت اطمینان شاخص‌ها، WRCC در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ محاسبه شد. روند تغییرات شاخص‌های مؤثر بر WRCC در شکل ۶ ارائه شده است. در شکل ۶a روند تغییرات دما، تبخیر و تعرق و بارش در حوضه در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود هرچند تغییرات این پارامترها در بازه زمانی دوره‌ای بوده ولی بارش و تبخیر و تعرق دارای روند افزایشی هستند و روند افزایش بارش از تبخیر و تعرق پیشی گرفته است. به طوری که میزان بارش از ۲۴۰ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ به ۳۵۹ میلی‌متر در سال ۲۰۲۰ بررسی با رشد ۴۸ درصدی همراه است در حالی که میزان تبخیر و تعرق از ۳۲۰ میلی‌متر در سال ۲۰۰۰ به ۳۳۴ میلی‌متر در سال ۲۰۲۰ با رشد ۴ درصدی مواجه بوده است. شکل ۶b بیانگر کاهش سطح مراتع و افزایش اراضی زیر کشت است. میزان تغییر کاربری اراضی در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ در حدود ۵۴۶۰۰ هکتار است که با رشد ۳۸ درصدی اراضی زیر کشت و کاهش همین مقدار مراتع است. شکل ۶c روند کاهشی کسری آب حوضه را نمایش می‌دهد. روند کاهشی کسری آب در حوضه را ناشی از افزایش میزان بارندگی می‌توان دانست. علیرغم افزایش اراضی زیر کشت به دلیل نوع کشت که به صورت کشت دیم و با محصول غالب گندم است، ملاحظه می‌شود وضعیت آبی حوضه در این بازه بهبود یافته است. در شکل ۶d روند تغییرات سرمایه بر اساس قیمت‌های ثابت و سرانه GDP در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰

نمایش داده شده است. مقادیر این پارامترها در بازه‌ای روند افزایشی داشته و شیب این منحنی‌ها از سال ۲۰۰۶ به شدت افزایشی گشته است که بیانگر افزایش سرمایه‌گذاری در حوضه است. میزان سرمایه‌گذاری در سال ۲۰۲۰ با رشد ۱۲ برابری سرمایه نسبت به سال ۲۰۰۰ مواجه است. بر اساس اطلاعات بانک مرکزی ایران عمده سرمایه‌گذاری از این سال در بخش‌های صنعت و خدمات بوده و بخش کشاورزی با سرمایه‌گذاری قابل توجهی همراه نیست و توسعه بخش کشاورزی به صورت معیشتی و با توسعه اراضی دیم صورت پذیرفته است. علیرغم افزایش میزان سرمایه‌گذاری، حوضه با کاهش سرانه GDP مواجه است که دلایل آن را در تغییرات نیروی کار و اراضی زیر کشت باید بررسی نمود چراکه بر اساس مدل اقتصادی ارائه شده، GDP تحت تأثیر این سه عامل است. شکل ۶e روند کاهش جمعیت و نیروی کار در حوضه را نمایش می‌دهد. در سال ۲۰۰۰ جمعیت حوضه ۱۱۴۷۸۸ نفر بوده و در سال ۲۰۲۰ این میزان جمعیت به ۹۹۳۸۹ نفر کاهش یافته است. که این کاهش جمعیت در حدود ۱۳ درصد است. کاهش جمعیت ناشی از کاهش نرخ زادوولد و همچنین، افزایش نرخ مهاجرت به دلایل معیشتی است (Ghorbani et al., 2022). افزایش میزان نیروی کار در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۶ می‌تواند ناشی از افزایش سرمایه‌گذاری در دیگر بخش‌های اقتصادی باشد. همچنین، الگوی رفتاری اشتغال در برخی از جوامع متفاوت است به نحوی که شاید

متغیرهای زبانی در بیان مفاهیم ارجح‌تر است. بهبود وضعیت WRCC در سال ۲۰۱۱ را می‌توان ناشی از بهبود وضعیت بارش در این سال و به تبع آن کاهش میزان کسری آب در حوضه دانست. هرچند میزان تبخیر و تعرق در این سال افزایش یافته ولی افزایش میزان بارش نسبت به تبخیر و تعرق وضعیت WRCC را بهبود بخشیده است.

به‌منظور بررسی نقش زیرسیستم‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی در برآورد WRCC شکل ۷ ارائه شد. ملاحظه می‌شود زیرسیستم‌های اقتصادی و اجتماعی به‌عنوان شیفت‌دهنده تأثیرات زیرسیستم محیطی بر WRCC هستند. روند تغییرات WRCC از زیرسیستم محیطی تبعیت می‌نماید. روند تغییرات مجموع پارامترهای زیرسیستم محیطی کاهشی است ولی به دلیل افزایش بودن روند تغییرات مجموع پارامترهای زیرسیستم‌های اقتصادی و اجتماعی مقدار WRCC در بازه بهبودیافته است. روند تغییرات زیرسیستم محیطی به شکل دوره‌ای بوده که ناشی از رفتار دوره‌ای پارامترهای مؤثر بر این زیرسیستم است. در زیرسیستم اجتماعی با کاهش میزان جمعیت در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ به دلیل ماهیت معکوس شاخص جمعیت، روند اثرات زیرسیستم اجتماعی بر WRCC افزایشی است. همچنین، روند شاخص‌های زیرسیستم اقتصادی افزایشی بوده و به دلیل ماهیت مثبت این شاخص‌ها، زیرسیستم اقتصادی منجر به افزایش روند WRCC می‌شوند (Yang et al., 2023). جهش میزان سرمایه‌گذاری در سال ۲۰۰۶ منجر به تغییرات اساسی در روند زیرسیستم اقتصادی شده و شاخص WRCC به‌صورت قابل‌توجهی افزایش یافته است.

جامعه دارای نیروی کار باشد ولی تمایلی به اشتغال نداشته باشند یعنی به‌صورت نیروی کار فعال نباشد و در برهه زمانی خاص وارد اشتغال شوند و مجدداً از چرخه فعالیت خارج شوند. هر یک از پارامترهای انتخاب‌شده بر اساس نوع ماهیت تأثیر مثبت یا منفی بر شاخص WRCC دارند. به‌طور نمونه اثرات افزایش دما بر میزان تبخیر و تعرق و افزایش تبخیر و تعرق بر آب در دسترس در حوضه اثر نامطلوب داشته لذا کاهش این شاخص‌ها بر WRCC اثر مثبت دارد. درحالی‌که هریک از شاخص‌ها دارای روندهای متفاوتی هستند شاخص‌های با ماهیت معکوس در صورت افزایش، اثرات نامطلوب به میزان وزن خود در محاسبه WRCC خواهند داشت. ملاحظه شد شاخص‌های جمعیت و توسعه مراعات کاهشی و شاخص‌های سرمایه، سرانه GDP، توسعه اراضی کشاورزی افزایشی بوده و بقیه شاخص‌ها روند دوره‌ای دارند. روند تغییرات WRCC شکل ۶f در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود روند WRCC بهبودیافته است. بهبود وضعیت می‌تواند ناشی از افزایش آب قابل‌دسترس در حوضه با توجه با روند افزایشی بارش و کاهش کسری آب در حوضه، کاهش میزان جمعیت و افزایش میزان سرمایه‌گذاری در حوضه رخ داده باشد. چراکه این تغییرات با مفهوم WRCC سازگار بوده و روند این تغییرات منجر به بهبود وضعیت WRCC می‌شود. همچنین، WRCC بر اساس وزن‌دهی به روش آنتروپی و آنتروپی خاکستری نمایش داده شده است که ملاحظه می‌شود روند تغییرات WRCC در این دو شیوه وزن‌دهی مشابه بوده و مقادیر WRCC در این دو شیوه در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ در حدود ۸ درصد اختلاف دارند. که در مقیاس مطالعه قابل‌توجه نبوده و استفاده از روش خاکستری به دلیل توانایی به‌کارگیری



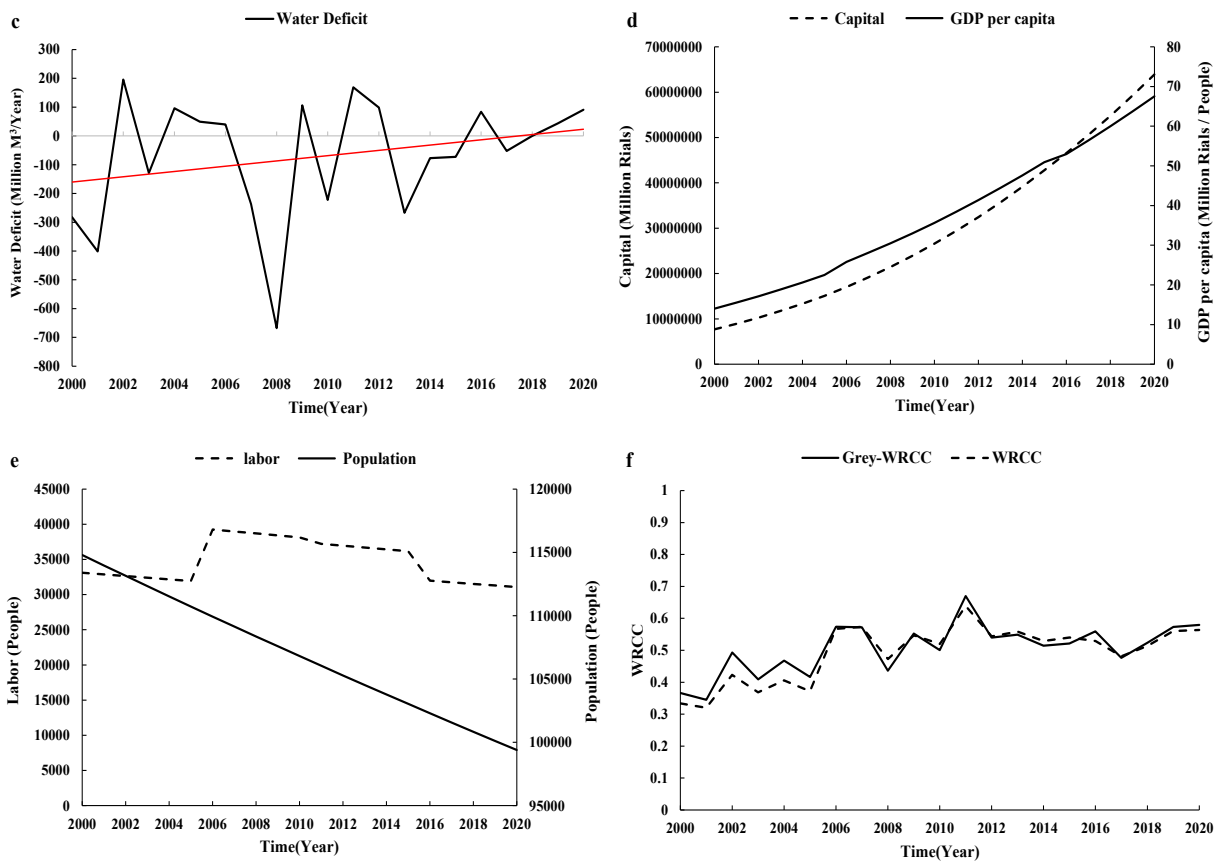


Fig. 6- Trend of water resources carrying capacity and the indicators affecting it
شکل ۶- روند تغییرات ظرفیت برد منابع آب و شاخص‌های مؤثر بر آن

شد. حداکثر خطاهای محاسبه شده برای این پارامترها به ترتیب ۳٪، ۵٪، ۷٪، ۲٪، ۵٪ و ۹٪ برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ بود.

برای اعتبارسنجی مقادیر پارامترهای به دست آمده از محاسبات مدل در برابر داده‌های تاریخی، کالیبراسیون برای پارامترهای سرمایه، جمعیت، توسعه زمین، نیروی کار و دبی خروجی از حوزه آبخیز انجام

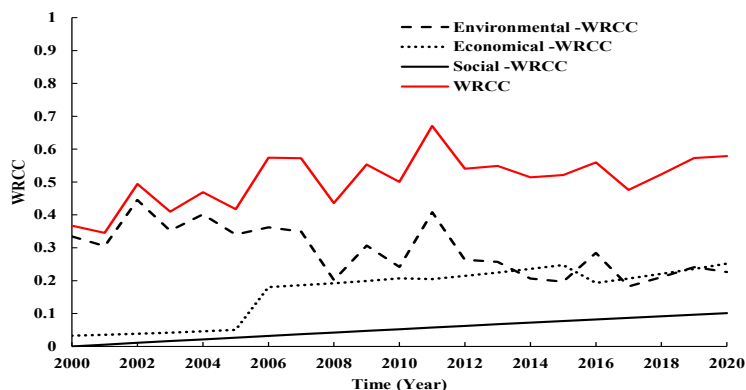


Fig. 7- Trend of water resources carrying capacity subsystems
شکل ۷- روند تغییرات زیرسیستم‌های ظرفیت برد منابع آب

۲-۳- عدم قطعیت و قابلیت اطمینان شاخص‌های مؤثر WRCC بر

پیچیدگی خاصی در بیان اثر و روند هر یک از شاخص‌های مؤثر بر WRCC وجود دارد. شکلی دیگر از بیان شاخص‌ها به منظور بهبود، درک و ارزیابی شاخص‌ها با استفاده از متغیرهای زبانی مورد توجه قرار گرفت. استفاده از متغیرهای زبانی برای فهم پدیده‌های

مفهومی بسیار مناسب‌تر است و بینش مناسب ارائه می‌نماید (Alam et al., 2023). متغیرهای زبانی درک بهتر از وضعیت شاخص‌ها و قابلیت اطمینان آن‌ها و تأثیر بر WRCC ارائه می‌نمایند. شاخص‌ها بر اساس جدول ۳ و WRCC بر اساس جدول ۴ قابل تبدیل به متغیرهای زبانی هستند که نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

Table 6- Values and reliability of indicators and WRCC via linguistic variables
جدول ۶- وضعیت و قابلیت اطمینان شاخص‌ها و ظرفیت برد منابع آب بر اساس متغیرهای زبانی

Year	IF										THEN	
	*Pr	T	ET	WD	P	CL	GDP	C	L	GDP per capita	Pop	WRCC
2000	(L,W)	(L,F)	(H,W)	(M,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,W)	(VL,W)	(L,W)	(VL,W)	(VL,W)	(P,F)
2001	(L,W)	(L,F)	(H,W)	(L,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,W)	(VL,W)	(L,W)	(VL,W)	(VL,W)	(P,F)
2002	(VH,W)	(H,W)	(H,W)	(VH,F)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,W)	(VL,W)	(VL,F)	(VL,W)	(VL,W)	(N,S)
2003	(M,W)	(L,F)	(H,W)	(H,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,W)	(VL,W)	(VL,F)	(VL,W)	(VL,W)	(N,F)
2004	(H,W)	(H,W)	(H,W)	(VH,F)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,W)	(VL,W)	(VL,F)	(VL,W)	(L,W)	(N,S)
2005	(H,W)	(L,F)	(M,W)	(VH,F)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,W)	(VL,W)	(VL,F)	(VL,W)	(L,W)	(N,S)
2006	(H,W)	(M,W)	(H,W)	(VH,F)	(H,W)	(H,W)	(L,W)	(VL,W)	(VH,W)	(L,W)	(L,W)	(N,F)
2007	(L,W)	(H,W)	(VH,W)	(M,W)	(H,W)	(H,W)	(L,W)	(L,W)	(VH,W)	(L,W)	(L,W)	(N,F)
2008	(VL,W)	(L,F)	(L,W)	(VL,W)	(H,W)	(H,W)	(L,W)	(L,W)	(VH,W)	(L,W)	(M,W)	(N,F)
2009	(VH,W)	(M,W)	(VL,W)	(VH,F)	(H,W)	(H,W)	(L,W)	(L,W)	(VH,W)	(L,W)	(M,W)	(N,F)
2010	(M,W)	(L,F)	(L,W)	(M,W)	(H,W)	(H,W)	(M,W)	(L,W)	(VH,W)	(M,W)	(M,W)	(N,F)
2011	(VH,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VH,F)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(L,W)	(H,W)	(M,W)	(M,W)	(G,F)
2012	(VH,W)	(L,F)	(VL,W)	(VH,F)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(H,W)	(M,W)	(H,W)	(N,F)
2013	(M,W)	(H,W)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(M,W)	(H,W)	(M,W)	(H,W)	(N,F)
2014	(VH,W)	(L,F)	(VL,W)	(H,W)	(M,W)	(M,W)	(H,W)	(M,W)	(H,W)	(H,W)	(H,W)	(N,F)
2015	(H,W)	(L,F)	(VL,W)	(H,W)	(L,W)	(L,W)	(H,W)	(H,W)	(H,W)	(H,W)	(H,W)	(N,F)
2016	(VH,W)	(H,W)	(M,W)	(VH,F)	(L,W)	(L,W)	(H,W)	(H,W)	(VL,F)	(H,W)	(VH,W)	(N,F)
2017	(H,W)	(VL,W)	(M,W)	(H,W)	(L,W)	(L,W)	(H,W)	(H,W)	(VL,F)	(H,W)	(VH,W)	(N,F)
2018	(H,W)	(M,W)	(L,W)	(H,W)	(VL,W)	(VL,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,F)	(VH,W)	(VH,W)	(N,F)
2019	(H,W)	(M,W)	(H,W)	(VH,F)	(VL,W)	(VL,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,F)	(VH,W)	(VH,W)	(G,F)
2020	(VH,W)	(H,W)	(M,W)	(VH,F)	(VL,W)	(VL,W)	(VH,W)	(VH,W)	(VL,F)	(VH,W)	(VH,W)	(G,F)

* Pr: Precipitation, T: Temperature, ET: Evapotranspiration, WD: Water Deficit, P: Pastures, CL: Cultivation Lands, C: Capital, L: Labor, Pop: Population

بارش و بهبود کسری آب حوضه در این دو سال یافت چراکه تغییرات شاخص‌ها از یک روند تبعیت نموده و در این دو سال به طور مشهودی میزان بارش و وضعیت کسری آب حوضه بهبود یافته است. این تغییرات بیانگر اثرات قابل توجه شاخص‌های محیطی بر WRCC هستند. هرچند اثرات زیرسیستم محیطی بر شاخص WRCC بر اساس شکل ۶ کاهش یافته است ولی روند افزایشی شاخص‌هایی نظیر بارش و بهبود کسری آب حوضه باعث تثبیت وضعیت WRCC در حال نرمال (N) بعد از سال ۲۰۰۲ شده است.

بر اساس جدول ۶ وضعیت WRCC در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ رو به بهبود است و ملاحظه می‌شود وضعیت WRCC حوضه از حالت فقیر (P) در سال ۲۰۰۰ به حالت خوب (G) در سال ۲۰۲۰ تغییر می‌نماید و در سال‌های آخر این وضعیت خوب (G) با قابلیت اطمینان قابل قبول (F) همراه است. دلایل بهبود وضعیت WRCC در سال ۲۰۰۲ از حالت فقیر (P) به حالت نرمال (N) و سال ۲۰۱۱ از حالت نرمال (N) به حالت خوب (G) با بررسی روند تغییرات شاخص‌های مؤثر بر WRCC بر اساس نمودارهای شکل ۵ می‌توان در افزایش

اطمینان قابل قبول (F) شده است. لذا اثرات مستقیم و عکس شاخص‌ها در WRCC به صورت زبانی بسیار قابل فهم‌تر است.

۳-۳- رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر بر WRCC

رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر بر WRCC نگرش مناسب‌تری به نتایج ارزیابی WRCC ارائه می‌نماید. به دلایلی نظیر نقص داده‌ها، ناهم‌جنس بودن داده‌ها، خطاهای مدل‌سازی و غیره عدم قطعیت در این شاخص‌ها مشهود است که می‌توان با استفاده از اعداد Z بیان بهتری از شاخص‌ها در کنار هم ارائه نمود (Nourani et al., 2021). به منظور انتخاب مؤثرترین شاخص بر WRCC از Z- TOPSIS استفاده شد. مقادیر زبانی شاخص‌های جدول ۶ با استفاده از شکل ۸ به اعداد Z تبدیل شدند. این شاخص‌ها به اعداد Z=(A,B) تبدیل شدند که در این اعداد A بیانگر مقدار فازی شاخص و B بیانگر قابلیت اطمینان فازی شاخص است. در فرآیند ارزیابی، مفاهیم معنایی اغلب نامشخص هستند، و اینکه آیا یک عنصر به یک مفهوم معنایی تعلق دارد، اغلب یک فرآیند تدریجی است. لذا مناسب‌ترین شیوه برای این‌گونه ارزیابی استفاده از مفهوم اعداد Z است (Li et al., 2021).

با تبدیل مقادیر شاخص‌ها به اعداد فازی هر کدام از این مقادیر دارای تابع عضویتی مطابق شکل ۸ هستند. سپس وزن هر شاخص به آن‌ها اعمال می‌شود تا تمام شاخص‌ها نرمال شوند. در میان شاخص‌های نرمال شده مورد بررسی در هر سال هر کدام در بهترین وضعیت باشد به عنوان گزینه ایده‌آل مثبت و هر کدام در بدترین وضعیت باشد به عنوان گزینه ایده‌آل منفی انتخاب شد. گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ به همراه قابلیت اطمینان آن‌ها محاسبه و در جدول ۷ ارائه شده است.

تغییرات شاخص WRCC از حالت نرمال (N) با قابلیت اطمینان قوی (S) در سال ۲۰۰۵ به حالت نرمال (N) با قابلیت اطمینان قابل قبول (F) در سال ۲۰۰۶ بیانگر اثر تغییرات شاخص‌های مؤثر بر WRCC است. چراکه با ایجاد تغییرات ناگهانی در مقادیر شاخص‌های مؤثر در سال‌های ذکر شده، حساسیت با اطمینان مدل به تغییر مقادیر با استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان رصد می‌شود. در سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۵ حوضه با تغییرات محسوس در مقادیر شاخص‌های مؤثر بر WRCC مواجه بوده به طوری که بارش کاهشی و به تبع آن حوضه با کسری آب مواجه بوده در کنار آن با افزایش سرمایه‌گذاری و نیروی کار مواجه است. این تغییرات ناگهانی با استفاده از مدل زبانی که قابلیت اطمینان عدم قطعیت را بیان می‌کند قابل فهم‌تر است. طوری که اطمینان به این تغییر پارامترهای اثرگذار با احتیاط بیشتر مطرح شده و از اطمینان به خروجی حوضه که WRCC است کاسته شده وضعیت قابلیت اطمینان حوضه از قوی (S) به قابل قبول (F) تغییر می‌نماید. شاخص‌های مؤثر بر WRCC مقادیر متفاوتی در سال‌های مختلف دارند به طور نمونه در سال ۲۰۱۶ وضعیت بارش خیلی زیاد (VH) با قابلیت اطمینان ضعیف (W)، وضعیت دما زیاد (H) با قابلیت اطمینان ضعیف (W)، وضعیت تبخیر و تعرق متوسط (M) با قابلیت اطمینان ضعیف (W) و بقیه شاخص‌های همان سال بر اساس جدول ۶ منجر به ایجاد WRCC نرمال (N) با قابلیت اطمینان قابل قبول (F) شده است. در حالی که در سال ۲۰۱۷ با وضعیت بارش زیاد (H) با قابلیت اطمینان ضعیف (W)، وضعیت دما خیلی کم (VL) با قابلیت اطمینان ضعیف (W)، وضعیت تبخیر و تعرق زیاد (H) با قابلیت اطمینان ضعیف (W) و بقیه شاخص‌های همان سال بر اساس جدول ۶ وضعیت شاخص WRCC نرمال (N) با قابلیت

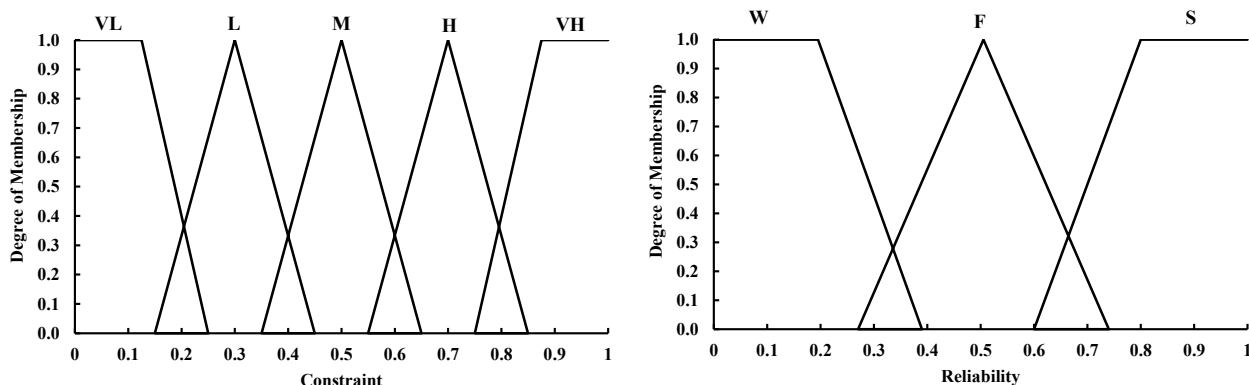


Fig. 8- Linguistic variable to Z-number Codebook

شکل ۸- نمودار تبدیل متغیرهای زبانی به اعداد Z

Table 7- Ideal positive and negative indicator based on Z-number
جدول ۷- گزینه‌های ایده‌آل مثبت و منفی بر اساس اعداد Z

Year	\tilde{R}_P^{id}		\tilde{R}_N^{id}	
	Constraint	Reliability	Constraint	Reliability
2000	(0.069,0.077,0.086)	(0.330,0.500,0.670)	(0.000,0.010,0.021)	(0.000,0.165,0.330)
2001	(0.069,0.077,0.086)	(0.330,0.500,0.670)	(0.000,0.010,0.021)	(0.000,0.165,0.330)
2002	(0.069,0.077,0.086)	(0.330,0.500,0.670)	(0.000,0.010,0.021)	(0.000,0.165,0.330)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2019	(0.128,0.144,0.160)	(0.330,0.500,0.670)	(0.000,0.009,0.017)	(0.000,0.165,0.330)
2020	(0.128,0.144,0.160)	(0.330,0.500,0.670)	(0.000,0.009,0.017)	(0.000,0.165,0.330)

DT⁻ استخراج و بر اساس رابطه نزدیکی نسبی شاخص‌ها رتبه‌بندی شدند که در جدول ۸ ارائه شدند.

فاصله هاسدروف بین شاخص‌ها از مقادیر ایده‌آل مثبت D⁺ و منفی D⁻ تهیه و فاصله نهایی گزینه‌ها از گزینه ایده‌آل مثبت DT⁺ و منفی

Table 8- Ranking indicators based on Z-TOPSIS and conventional TOPSIS
جدول ۸- رتبه‌بندی شاخص‌ها به روش Z-TOPSIS و TOPSIS

Attribute	Z-TOPSIS		Conventional TOPSIS	
	*RC	Rank	RC	Rank
Precipitation	0.448	10	0.128	9
Temperature	0.475	4	0.791	1
Evapotranspiration	0.596	1	0.696	3
Water Deficit	0.535	6	0.083	10
Pastures	0.324	9	0.270	8
Cultivation lands	0.671	2	0.730	2
GDP per capita	0.249	8	0.521	7
Capital	0.416	7	0.590	6
Labor	0.568	5	0.668	4
Population	0.748	3	0.628	5

*RC: Relative Closeness

کشاورزی و تبخیر و تعرق به‌عنوان اولویت‌های دوم و سوم در روش Z-TOPSIS و اراضی کشاورزی و جمعیت در روش Z-TOPSIS بیانگر اهمیت شاخص‌های محیطی و اجتماعی است. اولویت قرار گرفتن شاخص‌های زیرسیستم محیطی نشان از اهمیت این زیرسیستم در ارزیابی WRCC دارد. همچنین، رتبه‌بندی تبخیر و تعرق در بین سه اولویت اول هر دو روش رتبه‌بندی، بیانگر اهمیت این شاخص است. شاخصی که در این مطالعه بر اساس استفاده از مدل PML محاسبه شده است و توانایی نمایش اثرات تغییرات اقلیمی و همچنین، فعالیت‌های انسانی را دارد و این ارتباط اثرات مستقیم و اولویت‌دار تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را بر WRCC نشان می‌دهد.

در صورت فرض قابلیت اطمینان قوی (S) برای شاخص‌ها که نشان از تحقق شاخص‌ها با اطمینان بالا هست وضعیت رتبه‌بندی شاخص‌ها به‌صورت نیروی کار < سرمایه < سرانه تولید ناخالص داخلی < دما < مراتع < تبخیر و تعرق < اراضی کشاورزی < جمعیت < بارش < کسری آب حوضه شد. این رتبه‌بندی حاکی از

بررسی مقادیر جدول ۸ که رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر در برآورد WRCC را ارائه می‌نماید، نشان می‌دهد که در روش Z-TOPSIS شاخص‌ها به‌صورت تبخیر و تعرق < اراضی کشاورزی < جمعیت < دما < نیروی کار < کسری آب حوضه < سرمایه < سرانه تولید ناخالص داخلی < مراتع < بارش رتبه‌بندی شده و در روش TOPSIS به‌صورت دما < اراضی کشاورزی < تبخیر و تعرق < نیروی کار < جمعیت < سرمایه < سرانه تولید ناخالص داخلی < مراتع < بارش < کسری آب حوضه رتبه‌بندی شده‌اند. ملاحظه شد با اعمال عدم قطعیت و قابلیت اطمینان تبخیر و تعرق به‌عنوان مؤثرترین شاخص انتخاب شد و رتبه‌های دوم و سوم به شاخص‌های اراضی کشاورزی و جمعیت تعلق گرفت. درحالی‌که در روش TOPSIS اولویت اول با دما و اولویت‌های دوم و سوم به ترتیب با اراضی کشاورزی و تبخیر و تعرق است. به نظر می‌رسد انتخاب دما به‌عنوان اولویت اول در برآورد WRCC نمی‌تواند شاخص مناسبی باشد درحالی‌که انتخاب شاخص تبخیر و تعرق بر اساس روش Z-TOPSIS مناسب‌تر است. همچنین، شناسایی دو شاخص اراضی

نقش پررنگ شاخص‌های اقتصادی در صورت اطمینان از تحقق مقادیر شاخص‌ها است درحالی‌که مسائل محیطی در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرد و از اهمیت شاخص‌های محیطی که تأثیر قابل توجهی در مفهوم WRCC می‌تواند داشته باشند کاسته می‌شود لذا استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان در بهبود رتبه‌بندی مشهود است.

۴- جمع‌بندی

مطالعه انجام‌شده به‌منظور بررسی WRCC در حوضه قرنقو در شمال غرب ایران و اثرات شاخص‌های مؤثر بر آن است. با توجه به مطالعات محدود انجام‌شده در خصوص WRCC به‌ویژه در خصوص حوضه‌ها و علی‌الاصح حوضه‌های آبریز در ایران، این مطالعه با به‌کارگیری حداقل شاخص‌های مؤثر برای ارزیابی WRCC در فضای عدم قطعیت داده‌ها به دلیل کمبود اطلاعات، ناهم‌جنس بودن داده‌ها، خطاهای ناشی از مدل‌سازی و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا شمای کلی از وضعیت حوضه قرنقو را با حداقل اطلاعات ارائه نماید. در این مطالعه با بررسی روابط علی و معلولی پارامترهای مؤثر در میزان آب قابل‌دسترس در یک حوضه و عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی، یک مدل SD ایجاد شد تا تأثیر متقابل پارامترها در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ به دست آید. در این مدل ذهنی ایجادشده متغیر اراضی کشاورزی به‌عنوان متغیر ارتباطی زیرسیستم محیطی و اقتصادی و متغیرهای GDP و نیروی کار به‌عنوان متغیرهای ارتباطی زیرسیستم اقتصادی و اجتماعی شناسایی شدند. به‌طوری‌که با افزایش سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی، اراضی بیشتری زیر کشت قرار می‌گیرند که باعث افزایش میزان تبخیر و تعرق و کاهش آب دسترس در حوضه خواهد شد، این حلقه بازخورد در زیرسیستم محیطی به‌عنوان یکی از حلقه‌های غالب بوده و نقش کنترلی دارد. با افزایش اراضی زیر کشت میزان GDP افزایش‌یافته و باعث افزایش میزان سرمایه‌گذاری می‌شود. این حلقه بازخورد در زیرسیستم اقتصادی به‌عنوان یکی از حلقه‌های غالب بوده و نقش تشدید بازخورد را دارد. با افزایش GDP در حوضه میزان رفاه اجتماعی افزایش‌یافته و باعث مهاجرت به سمت حوضه و افزایش جمعیت می‌شود و به‌تبع آن درخواست برای کار افزایش‌یافته و وجود نیروی کار مؤثر به‌عنوان یکی از عوامل توسعه اقتصادی باعث افزایش GDP می‌شود. این حلقه بازخورد در زیرسیستم اجتماعی به‌عنوان یکی از حلقه‌های غالب بوده و نقش تشدید بازخورد را دارد. حلقه‌های غالب زیرسیستم‌ها نقش محوری در تغییرات درون مدل SD را ایفا می‌کنند. از اهمیت این مطالعه مدل‌سازی تبخیر و تعرق به‌عنوان

یک پارامتر مؤثر بر بیلان آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر اساس شیوه جدید برآورد تبخیر و تعرق به روش PML بود که موجب شد اثرات دما، بارش و تغییر کاربری اراضی در برآورد تبخیر و تعرق اعمال شود و در شاخص‌های انتخاب‌شده اثرات تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی مشاهده شود. سپس شاخص‌های مؤثر بر مفهوم WRCC استخراج شد و به دلیل وجود عدم قطعیت در ارتباط با این شاخص‌ها به دلایلی نظیر تنوع شاخص‌ها، برآورد دقیق آن‌ها، مدل‌های بکار رفته و غیره از شیوه‌های عدم قطعیت برای وزن‌دهی شاخص‌ها استفاده شد. این عدم قطعیت همراه با موضوع قابلیت اطمینان عدم قطعیت، موجب به‌کارگیری شیوه‌ای نوین از وزن‌دهی با ادغام تئوری خاکستری و آنتروپی شد. با محاسبه مقدار WRCC در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰، حوضه شاهد بهبود وضعیت WRCC بود و ملاحظه شد وضعیت WRCC حوضه از حالت فقیر (P) در سال ۲۰۰۰ به حالت خوب (G) در سال ۲۰۲۰ تغییر می‌نماید و در سال‌های آخر این وضعیت خوب (G) با قابلیت اطمینان قابل‌قبول (F) همراه است. بر اساس بیان شاخص‌های مؤثر بر WRCC به‌صورت متغیرهای زبانی که فهم آن آسان‌تر است و عدم قطعیت را نیز پوشش می‌دهند شکل جدیدی از بیان شاخص‌ها در قالب اعداد Z فراهم شد. که درنهایت بعد از استخراج WRCC با استفاده شیوه‌ای نوین در ارزیابی WRCC از Z-TOPSIS برای رتبه‌بندی شاخص‌های مؤثر در WRCC استفاده شد. رتبه‌بندی شاخص‌ها به‌صورت تبخیر و تعرق < اراضی کشاورزی > جمعیت < دما > نیروی کار < کسری آب حوضه > سرمایه < سرانه تولید ناخالص داخلی > مراتع < بارش انجام شد. که نشان از اهمیت شاخص تبخیر و تعرق با کسب رتبه اول است. جایگاه‌های بعدی به شاخص‌های توسعه اراضی کشاورزی و جمعیت تعلق یافت که بیانگر اهمیت زیرسیستم اجتماعی در کنار زیرسیستم محیطی است. به‌کارگیری متغیرهای زبانی و کلاس‌بندی شاخص‌ها، توانایی مدل برای اعمال قابلیت اطمینان را فراهم نمود. اعمال عدم قطعیت و قابلیت اطمینان باعث تغییر رتبه‌بندی شاخص‌ها شد که دلیل آن را در بازه‌های اعمال شده برای شاخص‌ها می‌توان جستجو نمود. با قرارگیری شاخص‌ها در میان بازه‌ها به دلیل کاهش عدم قطعیت وزن شاخص افزایش‌یافته و باعث تغییر در رتبه‌بندی می‌شود. به نظر می‌رسد مطالعات آتی با محاسبه WRCC برای حوضه‌های دیگر کشور، محدوده استان‌ها و کل کشور، نمای کلی از وضعیت منابع آب کشور و اثرات محیطی، اقتصادی و اجتماعی را تحت سناریوهای مختلف می‌تواند ارائه نمایند. همچنین، می‌توان با لحاظ نمودن شاخص‌های پایداری و چارچوب‌های نوآورانه در انتخاب شاخص‌های مؤثر محیطی، اقتصادی و اجتماعی و اعمال برخی از متغیرهای کیفی (مانند حکمرانی خوب، فقر، سلامت، برابری

- 15- Entropy
- 16- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
- 17- Fuzzy
- 18- Uncertainty
- 19- Z-Number
- 20- Reliability
- 21- Grey Theory
- 22- Z-Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
- 23- Hussedorff Distance
- 24- Pressure-State-Impact-Response
- 25- Casula-Loop Diagram
- 26- Stock-Flow Diagram
- 27- Social Welfare
- 28- Leaf Area Index
- 29- Coob- Doglas
- 30- Gross Domestic Product
- 31- Sen Index
- 32- Driver-Pressure-State-Impact-Response

جنسیتی، توزیع درآمد و غیره) در شاخص‌های مؤثر بر WRCC به تدقیق موضوع کمک بیشتری نمود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Carrying Capacity
- 2- Sustainable Development
- 3- Water Resource Carrying Capacity
- 4- System Dynamics
- 5- Feedback Loops
- 6- Integrated Water Resource Management
- 7- Water Budget Equation
- 8- Unsustainability
- 9- Torrent-Waite
- 10- Evapotranspiration
- 11- Penman-Monteith-Leuning
- 12- Anthropogenic Activity
- 13- Analytic Hierarchy Process
- 14- Best-Worth Method

۵- منابع

- Abbasi H, Delavar M, and Mohammadi Sedaran H (2022) Basin's water resource carrying capacity assessment in climate change conditions using simulation-optimization approach; case study: Tashk-Bakhtegan basin. *Water and Irrigation Management* 11(4):797–814 (In Persian)
- Alam NMFHNB, Ku Khalif KMN, Jaini NI, and Gegov A (2023) The application of Z-numbers in fuzzy decision making: the state of the art. *Information* 14(7):1–24
- Aliev RA, Huseynov OH, and Zulfugarova RX (2016) Z-distance based if-then rules. *The Scientific World Journal* (1):1673537
- Bellman RE, and Zadeh LA (1970) Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science* 17(4):B-141-B-164
- Central Bank of Iran (2016) Input-Output Table (In Persian)
- Chi M, Zhang D, Fan G, Zhang W, and Liu H (2019) Prediction of water resource carrying capacity by the analytic hierarchy process-fuzzy discrimination method in a mining area. *Ecological Indicators* 96:647–655
- Cobb CW and Douglas PH (1928) A theory of production, the american economic review. *American Economic Association* 18(1):139–165
- Cui Y, Feng P, Jin J, and Liu L (2018) Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method. *Entropy* 20(5):359
- Forrester JW (1971) Counterintuitive behavior of social systems. *Theory and Decision* 2(2):109–140
- Ghorbani F, Behboudi D, and Zarghami M (2022) Identification and thematic analysis of barriers to adaptation to climate change in the water resources system (case study: Qarranqu basin) *Iran-Water Resources Research* 18(3):46-62 (In Persian)
- Heydari A and Moghimi E (2008) Geomorphology and systemic management of the river, a case study_ Qaranqo basin to Sahand dam (HashTROD). *Geography* 5(15):119–137 (In Persian)
- Hwang CL and Yoon K (1981) Methods for multiple attribute decision making: Methods and applications a state-of-the-art survey. Springer Berlin Heidelberg 58–191
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II, and III, Fifth Assessment Report of the IPCC, Geneva, Switzerland 151 pp
- Ju-Long D (1982) Control problems of grey systems. *Systems & Control Letters* 1(5):288–294
- Kang J, Zi X, Wang S, and He L (2019) Evaluation and optimization of agricultural water resources carrying capacity in Haihe river basin, China. *Water* 11(5):999
- Keshavarz-Ghorabae M, Amiri M, Zavadskas EK, Turskis Z, and Antucheviciene J (2021) Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of Criteria (MEREC). *Symmetry* 13(4):525
- Keyvanfar M, Janatrostami S, and Ashrafzadeh A (2025) A comprehensive assessment of water resources carrying capacity in Anzali wetland using AHP-entropy-CRITIC combined weighting method and TOPSIS-GRA Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 56(1):105–126 (In Persian)
- Leuning R, Zhang YQ, Rajaud A, Cleugh H, and Tu K (2008) A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. *Water Resources Research* 44(10)
- Li Q, Liu Z, Yang Y, Han Y, and Wang X (2023a) Evaluation of water resources carrying capacity in Tarim river basin under game theory combination weights. *Ecological Indicators* 154:110609
- Li W, Liu S, Chang W, Zhang X, Li C, and Qin T (2023b) Research progress on the evaluation of water resources carrying capacity. *Polish Journal of Environmental Studies* 32(3):1975-1986
- Li Y, Pelusi D, Deng Y, and Cheong KH (2021) Relative entropy of Z-numbers. *Information Sciences* 581:1–17
- Liu Y, Gao C, Ji X, Zhang Z, Zhang Y, Liu C, and Wang Z (2022) Simulation of water resources carrying capacity of the Hangbu river basin based on system dynamics model and TOPSIS method. *Frontiers in Environmental Science* 10:1045907
- Lotfi FH and Fallahnejad R (2010) Imprecise shannon's entropy and multi attribute decision making. *Entropy* 53–62
- Luo X, Wang G, Mou Y, Liu R, Zhou H, Si H, and Chen Q (2017) The analysis of the water resource carrying capacity in the shale and gas exploration area, southwest China karst region- a case study from Cenggong county. *The Open Civil Engineering Journal* 11:258–269
- Lv Y, Wang Y, Zhang X, and Zhang D (2023) A study on the carrying capacity of water resources utilizing the fuzzy comprehensive evaluation model—illustrated by a case from Guantao county. *Water* 15(24):4277
- Meng C, Wang X, and Li Y (2018) An optimization model for water management based on water resources and environmental carrying capacities: A case study of the Yinma river basin, northeast China. *Water* 10(5):565
- Mohammadi Sedaran H, Delavar M, and Shahbazbegian M (2021) Assessment of water resources carrying capacity of the river basins using the simulation approach and iIndex-based evaluation method; case study: Zarrineh-Roud basin. *Iran-Water Resources Research* 17(2):154–

- 173 (In Persian)
- Nourani V, and Najafi H (2023) A Z-number based multi-attribute decision-making algorithm for hydro-environmental system management. *Neural Computing and Applications* 35(9):6405–6421
- Nourani V, Najafi H, Sharghi E, and Roushangar K (2021) Application of Z-numbers to monitor drought using large-scale oceanic-atmospheric parameters. *Journal of Hydrology* 598:126198
- Nourani V, Ahmadi R, Zhang Y, and Dąbrowska D (2025) Ensemble machine learning-based extrapolation of Penman-Monteith-Leuning evapotranspiration data. *Ecological Indicators* 170:113012
- Nourani V, Gholinia A, Abbaszadeh P, Ahmadi R, and Ke CQ (2024) Unravelling the impact of climate change and anthropogenic activities on streamflow: The benefit of newly developed evapotranspiration data. *Hydrological Sciences Journal* 69(14):2026–2043
- Peng J, Du Y, Liu Y, and Hu X (2016) How to assess urban development potential in mountain areas? An approach of ecological carrying capacity in the view of coupled human and natural systems. *Ecological Indicators* 60:1017–1030
- Phan TD, Bertone E, and Stewart RA (2021) Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems* 2:100031
- Rezaei J (2015) Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega* 53:49–57
- Saaty TL, and Alexander JM (1989) Conflict resolution: the analytic hierarchy approach. *Rws Publications*
- Sen A (1974) Informational bases of alternative welfare approaches: Aggregation and income distribution. *Journal of Public Economics* 3(4):387–403
- Shannon CE (1948) A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27(3):379–423
- Shao C, Guan Y, Chu C, Shi R, Ju M, and Shi J (2014) Trends analysis of ecological environment security based on DPSIR model in the coastal zone: A survey study in Tianjin, China. *International Journal of Environmental Research*. 8(3):765–778
- Song Q, Wang Z, and Wu T (2024) Risk analysis and assessment of water resource carrying capacity based on weighted grey model with improved entropy weighting method in the central plains region of China. *Ecological Indicators* 160:111907
- Statistical Center of Iran (2006) National population and housing census. (In Persian)
- Statistical Center of Iran (2016) National population and housing census. (In Persian)
- Statistical Center of Iran (2020) Annual labor force survey. (In Persian)
- Sun X, Peng A, Hu S, Shi Y, Lu L, and Bi A (2024) Dynamic successive assessment of water resource carrying capacity based on system dynamics model and variable fuzzy pattern recognition method. *Water* 16(2):304
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38(1):55–94
- Wang G, Xiao C, Qi Z, Meng F, and Liang X (2021a) Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun city, China. *Ecological Indicators* 122:107232
- Wang J, Mu X, Chen S, Liu W, Wang Z, and Dong Z (2021b) Dynamic evaluation of water resources carrying capacity of the Dianchi lake basin in 2005–2015, based on DSPERM framework model and simulated annealing-projection pursuit model. *Regional Sustainability* 2(2):189–201
- Wang XK, Wang YT, Wang JQ, Cheng PF and Li L (2020) A todim-promethee? Based multi-criteria group decision making method for risk evaluation of water resource carrying capacity under probabilistic linguistic Z-number circumstances. *Mathematics* 8(7):1190
- Wang X, Liu L, Zhang S, and Gao C (2022) Dynamic simulation and comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity in Guangzhou city, China. *Ecological Indicators* 135:108528
- Wang Y, Zhou X, and Engel B (2018) Water environment carrying capacity in Bosten lake basin. *Journal of Cleaner Production* 199:574–583
- Wen KL, Chang TC, and You ML (1998) The grey entropy and its application in weighting analysis. *SMC'98 Conference Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 98CH36218)*. IEEE 1842–1844
- Wu L, Su X, Ma X, Kang Y, and Jiang Y (2018) Integrated modeling framework for evaluating and predicting the water resources carrying capacity in a continental river basin of northwest China. *Journal of Cleaner Production* 204:366–379
- Wu X and Hu F (2020) Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method. *Ecological Indicators* 113:106243
- Yang JF, Lei K, Khu ST, Qiao F, and Liu Q (2015) Assessment of water ecological carrying capacity using an indicator-based method applied to Tieling city, China. *Water Supply* 15(5):940–947
- Yang L, Hao Y, Wang B, Li X, and Gao W (2025) Evaluation of the water resources carrying capacity in Shaanxi province based on DPSIRM–TOPSIS analysis. *Ecological Indicators* 173:113369
- Yang M, Qu D, Shen Y, Yang S, Liu B, and Lu W

- (2023) Evaluation of water resources carrying capacity of Zhangye city based on combined weights and TOPSIS modeling. *Water* 15(24):4229
- Yang X, Sun B, Lei S, Li F and Qu Y (2022) A bibliometric analysis and review of water resources carrying capacity using René Descartes's discourse theory. *Frontiers in Earth Science* 10:970582
- Zadeh LA (1965) Fuzzy sets. *Information and Control* 8(3):338–353
- Zadeh LA (2011) A note on Z-numbers. *Information Sciences* 181(14):2923–2932
- Zhang Y, Peña-Arancibia JL, McVicar TR, Chiew FHS, Vaze J, Liu C, Lu X, Zheng H, Wang Y, Liu YY, ... Pan M (2016) Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific Reports* 6(1):19124
- Zhang Z, Lu WX, Zhao Y, and Song WB (2014) Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process. *Ecological Modelling* 275:9–21
- Zyoud SH, Kaufmann LG, Shaheen H, Samhan S, and Fuchs-Hanusch D (2016) A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of fuzzy AHP with fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Applications* 61:86–105