

Assessment of the water resources carrying capacity of Anzali wetland using a combined AHP-entropy weighting method and forward cloud model

Maedeh Keyvanfar¹, Somaye Janatrostami^{2*}, Afshin Ashrafzadeh³

¹ Former M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

² Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

Extended Abstract

Introduction

For the sustainable development of the socio-economic economy, water resources are not only an important limiting factor but also play an irreplaceable role as a "carrier". "Carrying capacity" is a term derived from ecology that refers to the limitation of the maximum number of individuals under specific environmental conditions. Water Resources Carrying Capacity (WRCC) is the support capacity of water resources for the livelihood of the region's population and socio-economic development. Due to the differences in water resource systems, socio-economic conditions, and ecological environmental settings in various regions and natural conditions, the assessment of WRCC does not follow a consistent pattern across different geographical areas, making the evaluation of WRCC a complex issue. The aim of assessing and analyzing WRCC is to determine the relationship between limited water resources and population, the environment, and economic development.

Wetlands play a pivotal role in sustainable development as a vital resource. With an increasing population and economic growth, the pressure on water resources is rising. The Water Resource Carrying Capacity is defined as the ability of a water system to support human activities. In this study, considering the significance of Anzali wetland, which is being destroyed alongside the advancement of urbanization processes as part of the natural ecosystems, the water resources carrying capacity of Anzali wetland is being evaluated.

Materials and Methods

To evaluate the water resources carrying capacity, the water resource system of the region was modeled using the system dynamics method and VENSIM software. Based on the modeling results, eight evaluation indicators were defined to assess the WRCC of Anzali Wetland, considering three subsystems: population, water resources, economy, and environment. Subsequently, based on the modeling results, indices were defined for each subsystem with the aim of assessing the water resources carrying capacity of Anzali wetland, with a total of 8 indices considered for evaluation. The weighting of the indices was done using the combined AHP-Entropy method. In order to accurately assess the carrying capacity of water resources, aligning the results with the actual situation of the region, and considering the water resources of Anzali Wetland, the current water resources and consumption in the Fumanat study area (located upstream of Anzali Wetland), the economic and environmental conditions of the region, and the use of water resources in the area, the evaluation indices were divided into four levels based on the standards for grading water resource carrying capacity indices in previous research. These levels are: I (loadable), II (weak), III (critical), and IV (extremely critical). Finally, using a fuzzy model and determining the membership degrees of the indices at each evaluation level and for each year, the water resources carrying capacity index of Anzali wetland was calculated for different evaluation levels over a 10-year period.

Results and Discussion

To determine the initial weights of the evaluation indices, expert opinions were utilized, and acceptable results were obtained using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and Consistency Ratio (CR). Subsequently, composite weights were calculated by combining the AHP weights with entropy, with the highest weight attributed to the indicator of the water supply and demand ratio of the wetland (C7), followed by indicators such as the quality of input water resources and the impact of agricultural gross production. The results of this section demonstrate that the final composite weights are more realistic as the entropy method enhances the shortcomings of the AHP method, thereby improving the accuracy of the evaluation.

The results of the Water Resources Carrying Capacity (WRCC) assessment indicate a decreasing trend in the water resources carrying capacity of Anzali wetland between the years 1391 to 1400, shifting its capacity from level II (Weak) to level IV (Super Critical). The highest capacity is associated with the year 1391, while the lowest capacities are allocated to the years 1393, 1394, and 1400. Examination of the obstacle factors revealed that surface and groundwater resources significantly impact the water resources carrying capacity of the wetland, with several

indicators from the water resources subsystem identified as the main obstacle factors in this regard. These constraints pose challenges to improving the wetland's capacity, and the increase or decrease of these resources, especially under environmental and economic conditions, significantly influences the wetland's status

Conclusion

The results showed that the WRCC of the wetland had a decreasing trend during the study period and had reached a supercritical state. The most important factors affecting the reduction in carrying capacity were identified as the shortage of surface and groundwater resources and the poor quality of water entering Anzali Wetland. The overall findings of the investigations indicate that Anzali wetland has been in critical and super-critical conditions in recent years, highlighting the necessity for planning to improve its situation. Considering the obstacle factors identified in this study, efforts can be directed towards planning and managing the wetland to move towards a more desirable state.

Keywords: Water Resources, Cloud Model, System dynamics, Combination weights, Anzali Wetland.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Guilan for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Maedeh Keyvanfar: Conceptualization, methodology, Writing - original draft preparation, Formal analysis and investigation.

Somaye Janatrostami: Software, Manuscript editing, Conceptualization, methodology, Visualization, Supervision.

Afshin Ashrafzadeh: Resources, Software.

*Corresponding Author, E-mail: janatrostami@guilan.ac.ir

Citation: Keyvanfar, M., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2025). Assessment of the water resources carrying capacity of Anzali wetland using a combined AHP-entropy weighting method and forward cloud model. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2), 251 - 271.

doi:10.22098/mmws.2024.15960.1505

Received: 07 October 2024, Received in revised form: 15 November 2024, Accepted: 16 November 2024, Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 251-271.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی با استفاده از روش وزن دهی ترکیبی AHP-Entropy و مدل ابریشرو

مائده کیوانفر^۱، سمیه جنت رستمی^{۲*}، افشین اشرفزاده^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

برای توسعه پایدار اقتصاد-اجتماعی، منابع آب نه تنها یک عامل محدودکننده مهم است، بلکه نقش "حامل" غیرقابل جایگزین را نیز ایفا می کند. با افزایش جمعیت و رشد اقتصادی، فشار بر منابع آب رو به افزایش است. در این مطالعه با توجه به اهمیت تالاب انزلی به عنوان یکی از اکوسیستم های طبیعی که همراه با پیشرفت فرآیندهای شهرنشینی در حال نابودی است، ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی یک دوره ۱۰ ساله در استان گیلان، منطقه فومنت ارزیابی می شود. از این رو، ابتدا سیستم منابع آبی منطقه مورد مطالعه با روش پویایی سیستم و با استفاده از نرم افزار Vensim مدل سازی شد. سپس با توجه به نتایج مدل سازی، با هدف ارزیابی ظرفیت برد تالاب انزلی، هشت شاخص ارزیابی با در نظر گرفتن سه زیرسیستم منابع آب، اقتصاد و محیط زیست تعریف شد. بر اساس داده ها و اطلاعات ۱۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۰۰) در دسترس، هر شاخص در چهار سطح I (قابل بارگیری)، سطح II (ضعیف)، سطح III (بحرانی) و سطح IV (فوق بحرانی) طبقه بندی شدند. سپس وزن هر شاخص با استفاده از روش ترکیبی AHP-Entropy برآورد شد و توسط مدل ابریشرو درجه عضویت هر شاخص در هر سطح ارزیابی برای دوره زمانی مورد نظر تعیین شد. در نهایت، ظرفیت برد هر سال برای هشت شاخص در چهار سطح محاسبه و عوامل مانع هر سال تعیین شدند. نتایج ارزیابی نشان می دهد که ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی بین سال های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ روند کاهشی داشته و ظرفیت آن از درجه II (ضعیف) به IV (فوق بحرانی) تغییر یافته است. بالاترین ظرفیت مربوط به سال ۱۳۹۱ و پایین ترین ظرفیت به سال های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۴۰۰ اختصاص دارد. بررسی عوامل مانع نشان داد که منابع آب سطحی و زیرزمینی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت برد منابع آب تالاب دارند و چندین شاخص از زیرسیستم منابع آب به عنوان عوامل مانع اصلی در این زمینه شناسایی شده اند. این عوامل محدودیت هایی را بر بهبود ظرفیت تالاب ایجاد می کنند و افزایش یا کاهش این منابع به ویژه تحت تأثیر شرایط محیطی و اقتصادی، بر وضعیت تالاب تأثیرگذار است.

واژه های کلیدی: منابع آب، مدل ابری، پویایی سیستم، وزن های ترکیبی، تالاب انزلی.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: janatrostami@guilan.ac.ir

استناد: کیوانفر، مائده، جنت رستمی، سمیه، اشرفزاده، افشین (۱۴۰۴). ارزیابی ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی با استفاده از روش وزن دهی ترکیبی AHP-Entropy و مدل ابریشرو. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲)، ۲۷۱-۲۵۱.
doi: 10.22098/mmws.2024.15960.1505

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۲۵۱ تا ۲۷۱.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر منابع طبیعی برای حفظ ثبات اقتصادی و اجتماعی ضروری است. با این حال، با گسترش اقتصاد و افزایش جمعیت، مشکلات ناشی از تخریب محیط‌زیست و کاهش منابع آب در حال افزایش است؛ به‌طوری‌که در طول یک قرن، تعداد افرادی که با کمبود آب مواجه هستند، تقریباً ۱۶ برابر افزایش یافته است که این امر تأمین امنیت آبی را با مشکل مواجه کرده است (Kummu et al., 2016). در سال ۲۰۱۸، گزارش توسعه جهانی آب^۱ (WWRD) توسط سازمان ملل منتشر شد. در این گزارش هشدار داده شده است که با توجه به عواملی مانند رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییر حالت مصرف، تقاضای جهانی برای منابع آب به سرعت رشد خواهد کرد و این نرخ رشد در ۲۰ سال آینده شتاب قابل توجهی خواهد داشت. علاوه بر این، سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد^۲ (FAO) پیش‌بینی کرده است که تا سال ۲۰۳۰، ۴۷ درصد از جمعیت جهان در مناطقی با کمبود شدید آب زندگی خواهند کرد. بنابراین، واضح است که توسعه سریع اقتصاد و جامعه جهانی فشار زیادی بر ظرفیت برد منابع آب وارد کرده است و تضاد بین عرضه و تقاضا قابل توجه است. این موضوع باعث شده است که نحوه متعادل کردن ناهماهنگی‌های بین منابع آب و توسعه اقتصادی و اجتماعی به یکی از مباحث مهم در پژوهش‌های اخیر در راستای حرکت به سمت توسعه پایدار تبدیل شود (Gerlak et al., 2018; Ayoubikia et al., 2018; Eslami et al., 2019).

برای توسعه پایدار اقتصاد اجتماعی، منابع آب نه تنها یک عامل محدودکننده مهم است، بلکه نقش "حامل"^۳ غیرقابل جایگزین را نیز ایفا می‌کند. "ظرفیت برد"^۴ اصطلاحی برگرفته از اکولوژی است که به معنای محدودیت حداکثر تعداد افراد در شرایط محیطی خاص است. ظرفیت برد منابع آب^۵ (WRCC) ظرفیت پشتیبان منابع آب برای زندگی مردم منطقه و توسعه اجتماعی و اقتصادی است (Li and Chen, 2021). هدف از ارزیابی و تحلیل WRCC تعیین رابطه بین منابع آبی محدود و جمعیت، محیط‌زیست و توسعه اقتصادی است. این ارزیابی به‌منظور استفاده بهینه و معقول از منابع آب، همگام‌سازی توسعه اقتصادی با حفاظت از منابع آب و ترویج توسعه پایدار اقتصاد اجتماعی انجام می‌شود. به‌دلیل متفاوت بودن سیستم‌های منابع آب، اقتصادی-اجتماعی و محیط‌زیستی در مناطق و شرایط طبیعی مختلف، ارزیابی WRCC در مناطق مختلف جغرافیایی روند ثابتی ندارد و این امر ارزیابی WRCC را به موضوعی پیچیده

تبدیل می‌کند. تعریف WRCC باید از دیدگاهی سیستماتیک و جامع برخوردار باشد تا عوامل متعددی را پوشش دهد. بر این اساس، در حال حاضر، هیچ توافقی در مورد تعریف WRCC وجود ندارد، بنابراین مفهوم و محتوای آن هنوز به اندازه کافی روشن نیست (Duan et al., 2010). علی‌رغم چالش موجود در ارائه تعریف WRCC، محققان درک نسبتاً یکسانی از مفهوم ظرفیت برد منابع آب دارند به این صورت که از آن برای توصیف محدوده آستانه تحمل ظرفیت منابع آب با توجه اهداف اقتصادی و اجتماعی استفاده می‌شود (Peng et al., 2021).

به‌طور کلی، محاسبه ظرفیت برد منابع آب شامل سه مرحله تعریف شاخص‌های ارزیابی، محاسبه وزن شاخص‌ها و ساخت مدل ارزیابی است (Wang et al., 2022). یکی از محورهای اصلی پژوهش در زمینه WRCC، ساخت یک سیستم شاخص ارزیابی است. به‌عنوان مثال، با دیدگاه فشار-فشار، شاخص‌ها بر اساس مدل DPSIRM^۶ غربالگری می‌شوند (Peng and Deng, 2020) یا اینکه شاخص‌ها از دیدگاه منابع آب، اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست بر اساس رابطه بین زیرسیستم‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند (Zhang et al., 2019). برای محاسبه وزن شاخص‌ها در تعیین ظرفیت برد منابع آب، معمولاً از روش‌های وزن‌دهی تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (Xu et al., 2020; Zuo et al., 2021)، آنتروپی (Cui et al., 2018)، ترکیبی (Peng and Deng, 2020) و اصلاح روش محاسبه وزن بر اساس این سه روش (He et al., 2021) استفاده می‌شود. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، با توجه به تجربه کارشناسی و موقعیت منطقه مورد مطالعه، شاخص‌ها را از کیفی به کمی تبدیل می‌کند، روش وزن آنتروپی، اهمیت هر شاخص را با توجه به داده‌های مشاهده‌ای محاسبه می‌کند. روش وزن ترکیبی و روش اصلاح‌شده، کمبودهای دو روش AHP و آنتروپی را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث کاهش خطای نتیجه ارزیابی ناشی از محاسبه وزن شاخص می‌شود.

در حال حاضر، روش‌های محاسبه وزن‌ها اصولاً به دو بخش وزن‌دهی ذهنی (AHP) و وزن‌دهی عینی (Entropy) تقسیم می‌شوند (Lu et al., 2022). در روش وزن‌دهی ذهنی، وزن هر شاخص توسط یک کارشناس تعیین می‌شود؛ در روش وزن‌دهی عینی، رویکردهای ریاضی و نظری برای محاسبه استفاده می‌شود که به قضاوت کارشناسی محقق وابسته نیست. این رویکرد به ساده‌سازی مسائل پیچیده، معادله‌سازی مسائل چندوجهی،

⁴ Carrying capacity

⁵ Water resources carrying capacity

⁶ Drivers, pressures, state, impact, and response

¹ World water development report

² Food and agriculture organization

³ Carrying

ریاضیات فازی تئوری مدل ابر پیشرو را مطرح کردند. در این تئوری، سه مشخصه عددی مقدار مورد انتظار، آنتروپی و هاپیر آنتروپی برای توصیف مفهوم عدم قطعیت استفاده می‌شود. تاکنون در چندین مطالعه از مدل ابری برای ارزیابی مسائل مربوط به منابع آب استفاده شده است (Fu et al., 2016; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2020). به طور کلی، مدل ابری، همبستگی بین تصادفی و فازی بودن را در مفهوم عدم قطعیت منعکس می‌کند. این مدل تنها یکی از روش‌های نمایش و پردازش مفهوم عدم قطعیت است. از آنجایی که عدم قطعیت در دنیای عینی پیچیده است، هیچ مدل واحدی نمی‌تواند همه عدم قطعیت‌ها را پوشش دهد. بنابراین، چگونگی ترکیب مدل ابری با سایر مدل‌های نظری که با مشکلات عدم قطعیت سروکار دارند برای تشکیل یک نظریه و روش مؤثرتر، نیاز به مطالعه بیش‌تر دارد (Li and Chen, 2021).

در این مطالعه با توجه به اهمیت تالاب انزلی که به عنوان یکی از اکوسیستم‌های طبیعی همراه با پیشرفت فرآیندهای شهرنشینی در حال نابودی است، ضروری است که ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای ارزیابی ظرفیت برد منابع آب ابتدا مدل‌سازی محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش پویایی سیستم بر اساس زیرسیستم‌های جمعیت، منابع آب، اقتصادی و محیط‌زیستی انجام شد و در ادامه با توجه به نتایج مدل‌سازی، برای هر یک از زیرسیستم‌ها شاخص‌هایی با هدف ارزیابی ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی تعریف شد. وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش ترکیبی AHP-Entropy انجام شد و در نهایت با استفاده از مدل ابری، شاخص ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی برای سطح‌های ارزیابی مختلف در یک دوره ۱۰ ساله محاسبه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان گیلان یکی از استان‌های شمالی کشور با مساحت ۱۴۷۱۱ کیلومتر مربع است. مهم‌ترین تالاب این استان، تالاب انزلی است، که در عرض ۳۷ شمالی و طول ۴۹ شرقی واقع شده و از شمال به دریای خزر، از جنوب به صومعه سراء از شرق به پیربازار و از غرب به کپورچال و آبکنار محدود است (Zebardast and Jafari, 2011). تالاب انزلی دارای ۱۱ رود اصلی و ۳۰ رود فرعی است که پس از آبیاری مزارع و شالیزارها به همراه جریان‌های سطحی حوزه آبخیز تالاب به آن

کمی‌سازی چالش‌های کیفی و استفاده از داده‌های محدود برای حل پیچیده تصمیم‌گیری کمک می‌کند (Yang et al., 2021; Zyoude et al., 2016).

تاکنون از روش‌های متنوعی برای مطالعه و ارزیابی WRCC استفاده شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به ارزیابی جامع فازی، عنصر-ماده^۱، TOPSIS، جستجوی تصویر^۲، ردپای اکولوژیکی^۳، پویایی سیستم^۴، شبکه عصبی^۵، تحلیل مجموعه‌های جفت‌شده^۶ و مدل ابری^۷ اشاره کرد که به تدریج در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند (Cui et al., 2018; Deng et al., 2021; Fu et al., 2020; Mou et al., 2020; Wang et al., 2021; Wei et al., 2019; Wu et al., 2020; Yu et al., 2020; Zheng et al., 2020; Keyvanfar et al., 2025). با توجه به تنوع روش‌های ارزیابی WRCC، انتخاب مناسب‌ترین روش ارزیابی ضروری است. بررسی مطالعات ذکر شده نشان می‌دهد که نتایج جنبه‌های مختلف WRCC متنوع و ارزشمند هستند، اما هنوز مسائل و مشکلاتی وجود دارد. مفهوم WRCC بسط ایدئولوژی توسعه پایدار در حوزه منابع آب است. رویکرد مبتنی بر شاخص‌ها مبنایی برای ارزیابی پیشرفت کشورها در دستیابی به اهداف توسعه پایدار است (Sachs, 2012) که بعضی از مطالعات بر اساس ساخت شاخص‌های ارزیابی انجام شده است (Li and Chen, 2021; Zhao et al., 2021). بنابراین، انتخاب شاخص‌های ارزیابی در این فرآیند ضروری است و باید تمام جنبه‌های سیستم پیچیده WRCC را پوشش دهد (Wang et al., 2022).

ارزیابی WRCC، علی‌رغم اینکه داده‌های اولیه مورد نیاز در دارای عدم قطعیت هستند، ممکن است تعامل بین منابع آب، سیستم‌های محیط‌زیست اقتصادی اجتماعی و محیط‌زیست آبی این عدم قطعیت را بیش‌تر تقویت کند، که منجر به ارزیابی پیچیده‌تر می‌شود و بر فرآیند تصمیم‌گیری بعدی تأثیر می‌گذارد. به منظور حل مسأله، فازی بودن اطلاعات در هنگام ارزیابی WRCC در نظر گرفته می‌شود. در این راستا، روش ارزیابی جامع فازی (FCE) (Wu et al., 2018; Zhang et al., 2019) و روش ارزیابی فازی متغیر (VFE) (Li et al., 2019) از روش‌هایی هستند که در ارزیابی WRCC تحت عدم قطعیت‌های فازی مؤثر است. در این روش‌ها هنگامی که تابع عضویت به عنوان یک مقدار دقیق بیان می‌شود، حالت فازی خود را از دست می‌دهد و باعث عدم دقت در نتایج ارزیابی می‌شود. Li et al. (2019) برای نمایش هم‌زمان خاصیت فازی و تصادفی پارامترهای مورد استفاده بر اساس ترکیب نظریه احتمال و نظریه

⁵ Neural network

⁶ Set pair analysis method

⁷ Cloud model

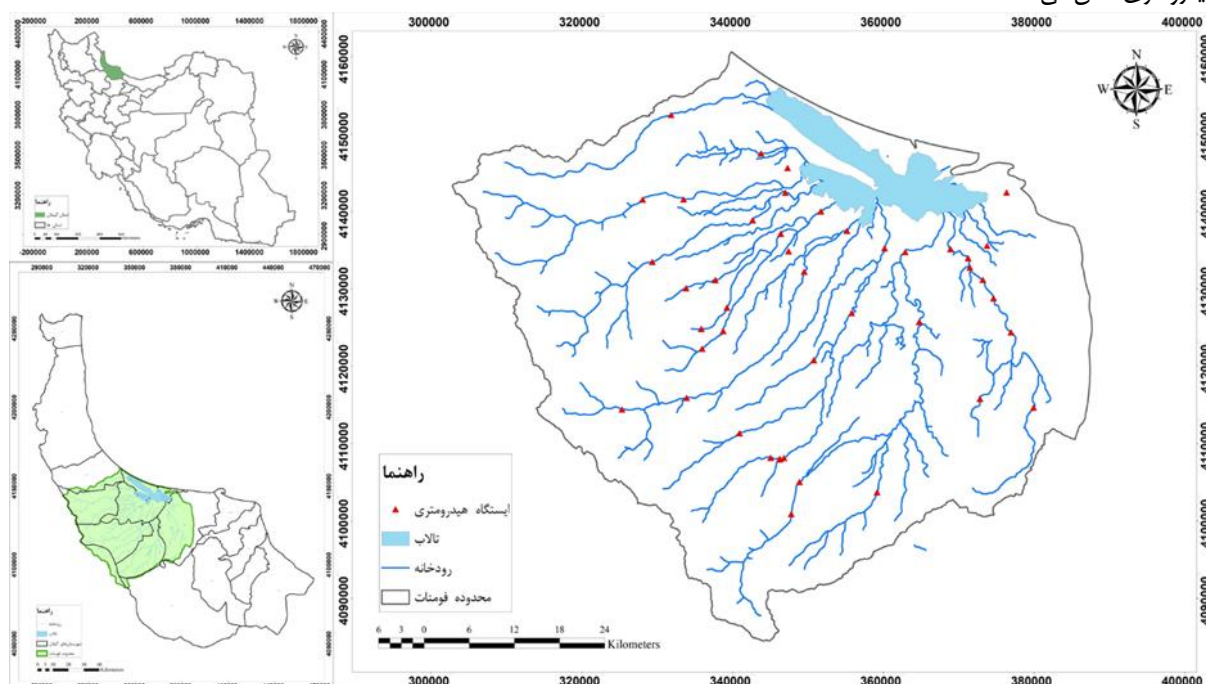
¹ Matter-element

² Projection pursuit

³ Ecological footprint method

⁴ System dynamics

وارد می شوند. (Avarideh et al., 2015). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی تالاب انزلی را به همراه رودخانه های حوضه و ایستگاه های هیدرومتری نشان می دهد.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز فومنات و ایستگاه های هیدرومتری آن در استان گیلان و ایران
Figure 1- Location of Foomanat Watershed and its hydrometric stations in guilan Province, Iran

$$L(t) = L_0 + \int_0^t \left(\sum R_{in}(t) - \sum R_{out}(t) \right) dt \quad (1)$$

در رابطه ۱ $L(t)$ مقدار متغیر حالت L در لحظه t است، L_0 مقدار ابتدایی متغیر حالت است، R_{in} جریان ورودی متغیر حالت است و R_{out} جریان خروجی متغیر حالت است. لازم به ذکر است که برای شبیه سازی سیستم به روش پویایی سیستم معمولاً از نرم افزار Vensim استفاده می کنند که در این مطالعه نیز از این نرم افزار استفاده شد.

۲-۳- روش وزن دهی AHP-Entropy

۲-۳-۱ روش وزن دهی AHP

در این مطالعه، تأثیر شاخص های مختلف بر WRCC متفاوت است، بنابراین تعیین وزن شاخص ها ضروری است. اصول اساسی و مراحل روش AHP به اختصار به شرح زیر است: -دائمه مسأله: درک عوامل مرتبط و شناسایی ارتباطات آن ها -مراحل اولیه و حیاتی را تشکیل می دهد. پس از تحلیل اولیه سیستم ارزیابی، ساختار سیستم به یک ساختار درختی

۲-۲- مدل پویایی سیستم (SD)

در سال ۱۹۵۶، پروفیسور جی از موسسه فناوری ماساچوست، مدل SD را بر اساس نظریه سیستم، سایبرنتیک^۱ و نظریه اطلاعات تاسیس کرد. در دهه ۱۹۷۰، انجمن رم با استفاده از این مدل، حد رشد را معرفی کرد (Ma and Lu, 2013; Yang et al., 2019).

مدل SD از نمودارهای جریان، معادلات و پلتفرم های شبیه سازی تشکیل شده است. نمودارهای جریان روابط منطقی بین عوامل درون سیستم را نشان می دهند و فرآیند بازخورد در سیستم را به تفصیل شرح می دهند. متغیرهای اصلی در نمودار جریان شامل متغیرهای حالت، متغیرهای نرخ و متغیرهای کمکی هستند (Wang et al., 2021). یک سیستم معادلات به مجموعه ای از عبارات ریاضی اشاره دارد که به طور کمی به هم پیوستگی بین عناصر درون یک سیستم را در بر می گیرد. این سیستم یک رابطه بازگشتی را مجسم می کند که توضیح می دهد چگونه حالت بعدی بر اساس یک حالت اولیه شناخته شده تعیین می شود (Ji et al., 2022).

¹ Cybernetics

$$\lambda \max \approx \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (6)$$

سپس برای اطمینان از اینکه وزن‌های تخصیص داده شده شاخص‌ها از نظر علمی معتبر هستند، آزمون سازگاری CR و شاخص سازگاری CI برای وزن‌ها باید به‌ترتیب محاسبه شوند.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (8)$$

۲-۳-۲- روش وزن‌دهی Entropy

روش وزن‌دهی انتروپی ریشه در نظریه اطلاعات دارد و از انتروپی اطلاعات به‌عنوان معیاری برای نامنظمی سیستم استفاده می‌کند. اطلاعات، به‌عنوان یک معیار عمل می‌کنند، و نظم سیستم را نشان می‌دهد، در حالی که انتروپی نامنظمی آن را اندازه‌گیری می‌کند. در سیستم ارزیابی، کاهش انتروپی اطلاعات محتوای اطلاعات غنی‌تری را نشان می‌دهد که به وزن بالاتری تبدیل می‌شود. در مقابل، افزایش انتروپی اطلاعات نشان‌دهنده کاهش اطلاعات و بنابراین، وزن کمتر در سیستم ارزیابی است. بنابراین، وزن هدف w_j هر شاخص توسط انتروپی اطلاعات محاسبه می‌شود. فرآیند محاسبه اصلی به صورت زیر است:

– استانداردسازی داده‌ها

برای شاخص‌های مثبت:

$$b_{ij} = \frac{b_{ij} - \min(b_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.0001 \quad (9)$$

برای شاخص‌های منفی:

$$b_{ij} = \frac{\max(b_{ij}) - b_{ij}}{\max(b_{ij}) - \min(b_{ij})} + 0.0001 \quad (10)$$

در روابط ۹ و ۱۰، b_{ij} مقدار نمونه‌ای از شاخص j ام در منطقه i است؛ $\max$ و $\min$ بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر در شاخص j ام هستند.

– تعیین وزن‌ها

محاسبه مقدار انتروپی:

$$y_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij} \quad (j=1,2,\dots,n)} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱ وزن b_{ij} شاخص j ام برای i ام نشان‌دهنده نسبت آن درون وزن شاخص متناظر y_{ij} است.

$$e_j = -K \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (12)$$

e_j انتروپی اطلاعات شاخص j ام است، $K=1/\ln n$ عدد ثابتی است و $0 \leq e_j \leq 1$.

در نهایت وزن‌ها با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

سلسله‌مراتبی تبدیل می‌شود که معمولاً از سه سطح تشکیل شده است: سلسله مراتب موضوع، سلسله مراتب قوانین و لایه شاخص بنیادی.

– از روش ساخت مقیاس برای ایجاد ماتریس قضاوت استفاده می‌شود. عوامل شاخص برای مقایسه یک به یک، تعیین اهمیت دو مورد نسبت به درجه اهمیت مقایسه شده و به دست آوردن وزن مربوط به شاخص، ماتریس قضاوت در جدول ۱ نشان داده شده است:

$$A = (b_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

در رابطه ۲، A ماتریس قضاوت است، b_{ij} ، $(i,j=1,2,\dots)$ نشان‌دهنده ضریب نشانگر i ام یا j ام است و b_{ij} نشان‌دهنده درجه اهمیت b_i در مقایسه با b_j است.

به‌منظور کمی‌سازی درجه اهمیت بین دو عامل شاخص، روش سنتی توصیف کمی با استفاده از روش ۹ مقیاسی استفاده می‌شود. معنای هر مقیاس در جدول ۱ نشان داده شده است. حداکثر مقدار ویژه $(\lambda_{\max})$ هر ماتریس قضاوت و بردار ویژه متناظر با آن محاسبه می‌شود. با نرمال‌سازی بردارهای ویژه، وزن‌های نسبی عناصر در سطح شاخص مربوط به وزن عناصر در سطح محاسبه می‌شود، این بردار ویژه با حداکثر مقدار ویژه مطابقت دارد.

جدول ۱- تعریف مقیاس‌های عددی سیستم امتیازدهی

Table1-Definition of Numerical Scales in Rating Systems

عدد	تعریف
مقیاس	
1	اهمیت برابر بین دو شاخص
3	اهمیت جزئی یک شاخص در مقایسه با شاخص دیگر
5	اهمیت قوی یک شاخص در مقایسه با شاخص دیگر
7	تسلط یک شاخص بر شاخص دیگر
9	تسلط مطلق یک شاخص بر شاخص دیگر
2, 4, 6, 8	مقادیر میانی بین دو سطح همسایه
	اگر نسبت اهمیت فاکتورهای i و j باشد، نسبت اهمیت J تا i متقابل‌ها b_{ij} است

$$K_i = \prod_{j=1}^n b_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

در رابطه ۳، K حاصل ضرب عناصر ماتریس در هر ردیف است، i تعداد ستون‌های ماتریس را نشان می‌دهد، j تعداد ردیف‌های ماتریس را نشان می‌دهد؛ n ستون n ام ماتریس را نشان می‌دهد.

$$\bar{w}_t = \sqrt[n]{K_i} \quad (4)$$

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \quad (5)$$

است که می‌توانند یک نقشه ابر قابل مشاهده را تولید کنند. مراحل ساخت ابر پیشرو با از استفاده از روابط ۱۶ تا ۱۸ شرح زیر است: تولید یک عدد تصادفی En' با En به عنوان میانگین و He^2 به عنوان واریانس:

$$En' = \text{NORM}(En, He^2); \quad (16)$$

تولید یک عدد تصادفی x با Ex به عنوان میانگین و Ex'^2 به عنوان واریانس:

$$x = \text{NORM}(Ex, Ex'^2); \quad (17)$$

محاسبه عضویت ابر:

$$\mu = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En'^2}}; \quad (18)$$

عنصر x با درجه اطمینان μ یک قطره ابر در U است؛ تکرار مراحل محاسبات a تا d تا زمانی که N قطره ابر تولید شود. پس از انجام پنج مرحله فوق، یک نقشه ابر ایجاد می‌شود. برای یک مفهوم کیفی، قطرات ابر تصادفی تولید شده توسط مولفه مدل ابر پیشرو اصلی به‌طور اصلی در بازه $[Ex-3En, Ex+3En]$ قرار می‌گیرند، قطرات ابر خارج از این بازه می‌توانند نادیده گرفته شوند. و برای مقدار مرزی یک سطح شاخص خاص، درجه عضویت دو بازه سطح مجاور برابر است، سپس برای شاخص با محدوده مقادیر سطح $[Cmax, Cmin]$ ، روابط محاسبه مقادیر مولفه‌های مدل ابر به‌صورت روابط ۱۹ تا ۲۱ به شرح زیر است:

$$Ex = \frac{Cmin - Cmax}{2} \quad (19)$$

$$\exp\left[-\frac{Cmax - Cmin}{8(En)^2}\right] \approx 0.05 \quad (20)$$

$$En = \frac{Cmax - Cmin}{2.355} \quad (21)$$

$$He = k \quad (22)$$

در رابطه ۲۲، مقدار k برای He یک ثابت است که معمولاً توسط محققان بر اساس تجربه انتخاب می‌شود. در این مطالعه برای این پارامتر، مقدار ثابت ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

۲-۵- تعیین درجه عضویت و محاسبه مقادیر ظرفیت برد منابع آب

پس از تعیین ماتریس‌های ورودی ابر پیشرو (Ex, En, He) ، با کدنویسی به زبان پایتون، درجه عضویت ۸ شاخص اصلی در ۴ سطح محاسبه شد. به دلیل ماهیت تصادفی روش مدل ابری برای تعیین عضویت جامع، میانگین مقادیر نتایج چندین اجرا به عنوان مقدار نهایی درجه عضویت استفاده می‌شود، به این ترتیب، مقادیر نهایی درجه عضویت شاخص i در سطح j با μ_{ij} نشان داده می‌شود و با استفاده از رابطه ۲۳ محاسبه می‌شود.

$$w_j = \frac{1 - e_j}{n \sum_{j=1,2,\dots,n}^n e_j} \quad (13)$$

۳-۳-۲- وزن دهی ترکیبی

در پاسخ به مزایای ذهنی و عینی دو روش، وزن‌های ذهنی و عینی تعیین شده برای تعیین وزن‌های جامع هر شاخص ارزیابی استفاده می‌شوند. وزن‌های جامع می‌توانند مزایای روش AHP و روش وزن آنتروپی را برجسته کرده و از معایب آن‌ها جلوگیری کنند. رابطه ۱۴ محاسبه وزن ترکیبی با استفاده از وزن‌های آنتروپی و سلسله مراتبی به شرح زیر است:

$$w''_j = \alpha w_i + (1-\alpha)w_j \quad 0 \leq w''_j \leq 1 \quad (14)$$

در رابطه ۱۴ w''_j وزن محاسبه شده ترکیبی است؛ w_i مقدار وزن‌هایی است که از طریق روش تحلیل AHP به دست آمده‌اند؛ w_j مقدار وزن محاسبه شده توسط روش وزن دهی آنتروپی است؛ α ضریب همبستگی تصمیم‌گیری است. هر دو روش محاسبه وزن به یک اندازه مهم هستند؛ بنابراین، α برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴-۲- ارزیابی سیستم‌های منابع آب بر اساس مدل ابر پیشرو

برای حل مشکل عدم قطعیت ناشی از تبدیل زبان کیفی به بیان کمی، نظریه مدل ابر پیشرو توسط (Li et al., 2004) پیشنهاد شد. مفهوم ریاضی آن به شرح زیر توضیح داده شد فرض کنید U یک دامنه متشکل از یک مجموعه داده است، A یک مفهوم بیان کیفی است که توسط U ترسیم شده است، هر عنصر x در دامنه U یک تحقق تصادفی از مفهوم کیفی است، و درجه عضویت x به مفهوم کیفی A برابر با $\mu(x) \in [0,1]$ است، که یک عدد تصادفی با تمایل پایدار است، که می‌تواند با رابطه ۱۵ بیان شود:

$$\mu : U \rightarrow [0,1] \quad \forall x \in U \rightarrow \mu(x) \quad (15)$$

رابطه ۱۵ نشان‌دهنده توزیع نرمال است که در آن E مقدار مورد انتظار و σ انحراف معیار است. این مدل کمک می‌کند تا عدم قطعیت‌ها و تغییرات تصادفی در ارزیابی‌های کیفی به صورت کمی بیان شود.

از نظر تئوری، توزیع x در U را می‌توان با ویژگی‌های عددی ابر (Ex, En, He) توصیف کرد. (Ex) ارزش مرکزی مفهوم را در فضای U نشان می‌دهد. (En) معیار درجه قابل اندازه‌گیری مفهوم کیفی است که با تصادفی بودن و فازی بودن مفهوم تعیین می‌شود؛ ابر آنتروپی He عدم قطعیت آنتروپی است که درجه تراکم قطرات ابر را تعیین می‌کند؛ علاوه بر این، N تعداد قطرات ابری

عوامل در سیستم WRCC استفاده می‌شود و نتایجی که به واقعیت نزدیک هستند را ارائه می‌دهد. با استفاده از تحلیل داده‌های موجود، مدلی با سه زیرسیستم منابع آب، اقتصاد و محیط‌زیست آبی ایجاد شد، طوری که توانایی شبیه‌سازی تأثیر سناریوهای مختلف بر توسعه تالاب انزلی را داشته باشد.

۱-۷-۲- زیرسیستم منابع آب

برای ارزیابی WRCC، ایجاد زیرسیستم جمعیت نقش حیاتی در سیستم منابع آب ایفا می‌کند و به عنوان پایه‌ای برای پیشرفت و توسعه اجتماعی انسانی عمل می‌کند. میزان جمعیت، شرایط منابع آب، محیط‌زیست آبی، اقتصاد و سایر سیستم‌ها را تعیین می‌کند و تعاملات متقابلی بین زیرسیستم جمعیت و سایر زیرسیستم‌ها وجود دارد. بنابراین، توصیف دقیق تغییرات جمعیت به عنوان پایه‌ای برای تحلیل WRCC در این مطالعه عمل می‌کند.

پس از تعریف زیرسیستم جمعیت، زیرسیستم منابع آب ایجاد می‌شود. تمرکز اصلی زیرسیستم منابع آب بر بررسی تعادل بین تأمین و تقاضای آب به خصوص ارتباط بین کل تأمین و تقاضای آب است. کل آب تأمین یافته نه تنها نیازهای اساسی شرب و خانگی را برآورده می‌کند، بلکه به عنوان زیربنای فعالیت‌های اقتصادی نیز عمل می‌کند. ساختار داخلی این زیرسیستم ارتباط بین منابع آب سطحی و منابع آب زیرزمینی را ترسیم می‌کند. هم‌زمان، کل تقاضای آب وابستگی قابل توجهی به منابع آب برای توسعه اقتصادی دارد. نیازهای مصرف آب در بخش‌های مختلف تحت تأثیر سطح فناوری قرار دارد و شامل مصرف آب کشاورزی، صنعتی و خانگی می‌شود. حفظ تعادل بین عرضه و تقاضای آب برای پایداری سیستم منابع آب حیاتی است. عدم تعادل‌ها، ناشی از عواملی مانند رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و تقاضای بیش از حد آب در بخش‌های مختلف، می‌تواند فشارهایی بر سیستم منابع آب وارد کند. این عدم تعادل‌ها می‌توانند تعادل بین عرضه و تقاضا را مختل کرده و دستیابی به استفاده پایدار از منابع آب را دشوار کنند. برای درک این پویایی، این مطالعه یک عامل تعادل آب را معرفی می‌کند که تغییرات در نسبت عرضه آب به تقاضای آب را نشان می‌دهد. با ارتباط دادن عامل تعادل آب با عناصری مانند تغییرات جمعیت و رشد اقتصادی، تعاملات متقابل بین عرضه و تقاضا در میان این عناصر به طور مؤثری نشان داده می‌شود. نمودار جریان مدل سازی این زیرسیستم در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$\mu_{ij} = \sum_{k=1}^N \mu_{ij}^m / N \quad (23)$$

در رابطه ۲۳، μ_{ij}^m درجه عضویت m ام از شاخص i به سطح j است، و N تعداد اجراهای مولفه مدل ابر پیشرو است.

سرانجام، با ترکیب نتایج محاسبه وزن شاخص، مقادیر ظرفیت برد منابع آب در هر سطح ارزیابی را می‌توان به دست آورد.

$$WRCC = \sum_{i=1}^n \mu_{ij} \omega_i \quad (24)$$

۲-۶- شناسایی عوامل اصلی مانع در WRCC

برای ارائه تدابیر مدیریتی و کنترل هدفمند در راستای بهبود وضعیت ظرفیت برد منابع آب، شناسایی عوامل اصلی تأثیرگذار در WRCC ضروری است. مدل عامل مانع^۱ برای محاسبه دقیق تر عوامل مانع شاخص‌ها با توجه به هدف کلی ارزیابی WRCC استفاده می‌شود. عامل مانع با استفاده از روابط ۲۵ و ۲۶ محاسبه می‌شود (Zhou et al., 2020):

$$O_{ij} = \frac{d_{ij}f_{ij}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}f_{ij}} \times 100\% \quad (25)$$

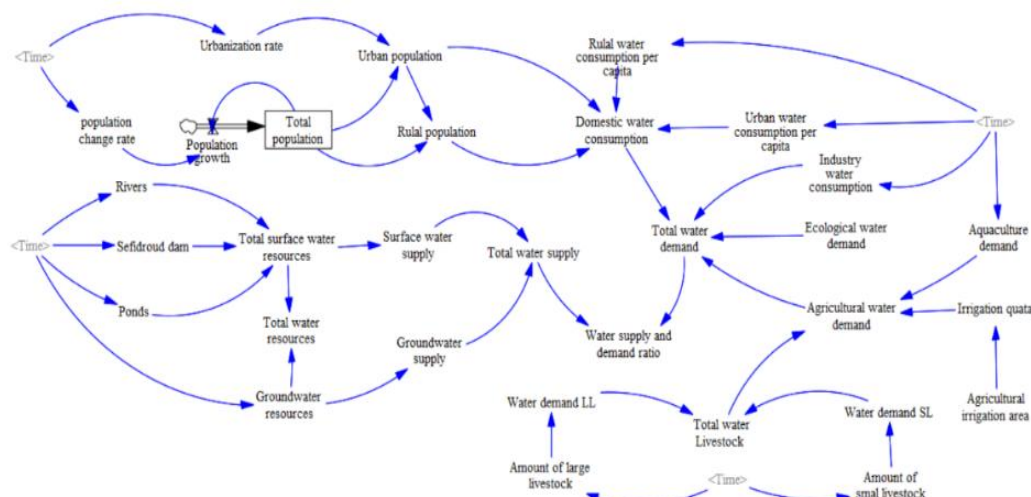
$$d_{ij} = 1 - y_{ij} \quad (26)$$

در رابطه ۲۵، O_{ij} نشان‌دهنده عامل مانع یک شاخص منفرد در هر سطح است؛ f_{ij} سهم هر شاخص است که نشان‌دهنده سهم یک شاخص منفرد در هر سطح است و در رابطه ۲۶، d_{ij} درجه انحراف شاخص است.

۷-۲- مدل سازی پویایی‌های سیستم

برای ارزیابی سیستم WRCC، به دلیل اینکه تحت تأثیر عواملی مانند جمعیت، اقتصاد، منابع آب، محیط‌زیست آبی و کاربری اراضی قرار دارد، شناسایی تمام عوامل مؤثر بر سیستم منابع آب پیچیده است. در این راستا، روش‌های تحلیل متداول عمدتاً بر بررسی و پیش‌بینی شاخص‌های فردی تمرکز دارند و این روش‌ها، تنها یک برآورد کلی از WRCC برای یک منطقه خاص ارائه می‌دهند (Xing et al., 2019; Wang et al., 2022). این روش‌ها باید تعاملات و تنظیمات پویایی بین عوامل متعدد را در نظر بگیرند تا نیازهای سیستم شبیه‌سازی را برآورده کنند. با این حال، مدل پویایی سیستم (SD) توانایی در نظر گرفتن روابط متقابل و بازخورد پویا در سیستم‌های متنوع را دارد. در این مطالعه، از نرم‌افزار مدل سازی SD، Vensim، برای ترسیم تعاملات

^۱ Obstacle degree model

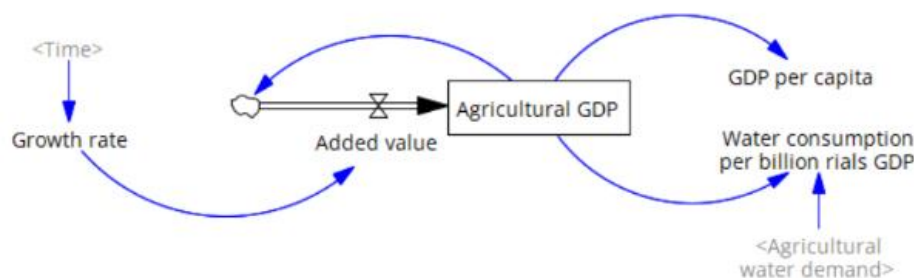


شکل ۲- مدل سازی زیرسیستم منابع آب و جمعیت
Figure 2- Modeling of Water Resources and Population Subsystem

تفاوت‌هایی در ساختار تقاضای آب در مصارف مختلف وجود دارد که نشان‌دهنده ارتباط ذاتی بین ساختار اقتصادی و استفاده بهینه از منابع آب است. با این حال، توسعه اقتصادی تنها مصرف‌کننده منابع آب نیست؛ بلکه توسط نرخ منابع آب نیز محدود می‌شود. در شرایطی که عرضه منابع آب کم‌تر از تقاضا باشد، رشد اقتصادی محدود می‌شود. برای بررسی این پویایی، این مطالعه عامل تعادل آب را برای بررسی تأثیر آن بر سیستم اقتصادی در نظر می‌گیرد. نمودار جریان مدل سازی این زیرسیستم در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲-۷-۲- زیرسیستم اقتصادی

زیرسیستم اقتصادی با توجه به تولید ناخالص داخلی (GDP) تشکیل می‌شود که یک عنصر محوری در کل سیستم است. مسیر توسعه اقتصادی به طور مستقیم بر تعادل بین عرضه و تقاضای منابع آب نیز وضعیت محیط زیست آبی تأثیر می‌گذارد. رشد سریع اقتصادی تقاضا برای منابع آب در بخش‌های مختلف مصرف را تشدید می‌کند و فشارهای بیش‌تری بر عرضه و تقاضا وارد می‌کند. این موضوع نیاز فوری به مدیریت مؤثر منابع آب را برجسته می‌کند؛ زیرا ناکافی بودن در این جنبه می‌تواند بر پیشرفت مستمر اقتصاد تأثیر بگذارد (Zhang et al., 2016). علاوه بر این،

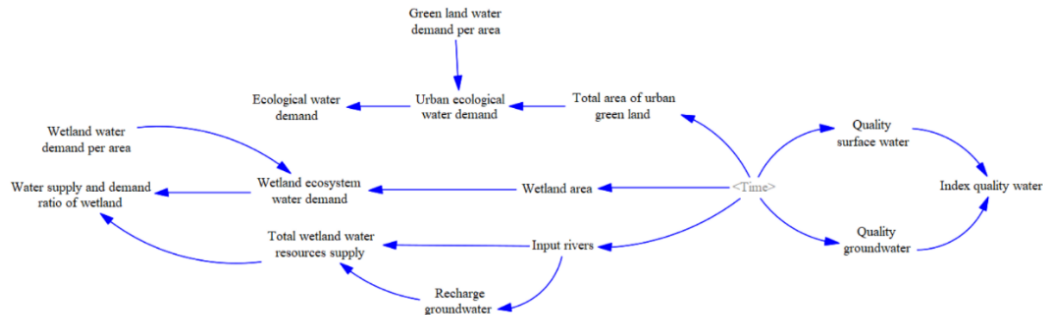


شکل ۳- مدل سازی زیرسیستم اقتصادی
Figure 3- Economic Subsystem Modeling

نسبت تأمین و تقاضای آب مورد نیاز تالاب و کیفیت منابع آب ورودی به تالاب می‌شود که تحت تأثیر نحوه مصارف آب در بالادست تالاب قرار دارد. نمودار جریان مدل سازی این زیرسیستم در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲-۷-۴- زیرسیستم‌های محیط زیست آبی

محیط زیست آب بخش مهمی از توسعه شهری و صنعتی است که به طور مستقیم بر زندگی و سلامت انسان نیز سطح توسعه اقتصادی تأثیر می‌گذارد. این زیرسیستم شامل شاخص‌هایی مانند



شکل ۴- مدل سازی زیرسیستم محیط زیست
Figure 4- Environmental Subsystem Modeling

در رابطه ۲۹ k نسبت متناسب است که با استفاده از رابطه ۳۰ محاسبه می شود:

$$k = \frac{1}{\sum \frac{1}{S_i}} \quad (30)$$

۸-۲- تعریف شاخص ها

پژوهش ها نشان می دهد که WRCC یک سیستم بزرگ و پیچیده است که بر ایجاد یک سیستم ارزیابی علمی برای ارزیابی دقیق سیستم مورد مطالعه تأکید دارد. در این راستا، انتخاب شاخص هایی که در چندین منطقه قابل اجرا باشند و وضعیت فعلی منطقه مورد مطالعه را به طور واقعی منعکس کنند، دارای اهمیت است. در این مطالعه، برای انتخاب شاخص های ارزیابی دو نکته مورد توجه قرار گرفت. در ابتدا مطالعاتی که در زمینه ارزیابی ظرفیت برد منابع آب بودند، مورد بررسی قرار گرفت و شاخص هایی که بیش تر مورد استفاده قرار می گرفتند انتخاب شدند (Liu et al., 2022; Murgatroyd et al., 2021; Makropoulos et al., 2008). سپس، شاخص های منتخب در مرحله قبل، بر اساس مطالعات منطقه ای موجود و داده ها و اطلاعات در دسترس در محدوده مطالعاتی فوئانات نیز وضعیت فعلی تالاب انزلی انتخاب شدند. به این ترتیب، با هدف تعیین ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی، ۸ شاخص ارزیابی تعریف شد که به سه بخش وضعیت منابع آب، وضعیت اقتصادی و محیط زیست طبقه بندی شد. شاخص ها به دو گروه شاخص های مثبت و منفی تقسیم شدند. هر چه مقدار شاخص مثبت بزرگ تر باشد، ظرفیت برد منابع آب بیش تر و هر چه مقدار شاخص منفی بزرگ تر باشد، ظرفیت برد منابع آب کم تر است (Zhang et al., 2019). برای تعیین مقادیر شاخص های ارزیابی منتخب، شرایط موجود در منطقه با استفاده از مدل پویایی سیستم در یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۱-۱۴۰۰) شبیه سازی شد. در جدول ۲، سیستم شاخص های ارزیابی معرفی شدند.

کیفیت آب سطحی به ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب در رودخانه ها، دریاچه ها و سایر منابع آب سطحی اشاره دارد و بر سلامت انسان، محیط زیست و اقتصاد تأثیر می گذارد. برای محاسبه کیفیت آب سطحی با استفاده از داده های برداشت شده از رودخانه ها پارامترهای Ec و PH و TDS و Na و K و Mg و Ca و Cl و HCO_3 و Co_3 و So_4 و $Dama$ هر سال به دست آمده و میانگین سالانه آن محاسبه شد. سپس برای داده های به دست آمده شاخص کیفی $WAWQI^1$ تعریف شد.

شاخص $WAWQI$ شاخص کیفی آب با میانگین وزنی است. این شاخص یک روش استاندارد برای ارزیابی کیفیت آب در یک دوره زمانی مشخص است. $WAWQI$ با در نظر گرفتن غلظت چندین پارامتر مهم کیفیت آب مانند اکسیژن محلول، pH ، کدورت، نیترات و فسفات محاسبه می شود. هر پارامتر بر اساس اهمیت آن برای سلامت انسان و محیط زیست وزن خاصی دریافت می کند.

مقدار $WAWQI$ با استفاده از رابطه ۲۷ محاسبه می شود:

$$WAWQI = \sum Q_i W_i / \sum W_i \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)، Q_i مقیاس رتبه بندی برای هر پارامتر است که با استفاده از رابطه ۲۸ محاسبه می شود.

$$Q_i = 100 \times [v_i - v_0] / [S_i - v_0] \quad (28)$$

در رابطه ۲۸، v_i غلظت برآورد شده از پارامتر در آب مورد تحلیل، v_0 مقدار ایده آل این پارامتر در آب خالص و S_i مقدار استاندارد پارامتر است. W_i هم وزن واحد برای پارامتر کیفیت آب است که با استفاده از رابطه ۲۹ محاسبه می شود:

$$W_i = k / S_i \quad (29)$$

¹ Weighted average water quality index

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی منتخب در ارزیابی جامع وضعیت ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی

Table 2- Selected Evaluation Indicators in the Comprehensive Assessment of the Water Resources Carrying Capacity of Anzali Wetland			
Subsystem	Indicator	Unit	Indicator direction
Water resources	Surface water resources per unit area (C1)	m ³ /ha	+
	Groundwater resources per unit area (C2)	m ³ /ha	+
	Water resources per capita (C3)	m ³ /person	+
	Supply-demand ratio (C6)	%	-
Economic	GDP per capita (C4)	million Rials/person	+
	Water consumption of GDP (C5)	m ³ /million Rials	-
Environmental	Wetland water supply-to-demand ratio (C7)	%	+
	Water quality index (C8)	%	-

در ادامه، به منظور ارزیابی دقیق‌تر ظرفیت برد منابع آب، به‌طوری که نتایج مطابق با وضعیت واقعی موجود در منطقه باشد، با توجه به وضعیت منابع آب تالاب انزلی با در نظر گرفتن وضعیت منابع و مصارف آب موجود در محدوده مطالعاتی فومنات که در بالادست تالاب انزلی واقع شده است. همچنین، وضعیت اقتصادی و محیط‌زیستی منطقه و استفاده از منابع آب محدوده و با توجه استانداردهای درجه‌بندی شاخص‌های ظرفیت برد منابع آب در پژوهش‌های انجام شده (Merg et al, 2016; Zhao et al, 2016)، شاخص‌های ارزیابی به چهار سطح I (قابل بارگیری)، II (ضعیف)، III (بحرانی) و IV (فوق بحرانی) تقسیم شد. اطلاعات جزئی‌تر در مورد معیارهای درجه‌بندی هر سطح شاخص در جدول ۳ آورده شده است.

شاخص‌های C1 و C2 از تقسیم منابع آب سطحی و زیرزمینی در دسترس بر مساحت آبخوان منطقه محاسبه شده است. با توجه به جمعیت منطقه و محاسبات نیاز آبی سالانه هر نفر، شاخص C3 از تقسیم کل منابع آب بر جمعیت محاسبه شده است. بر اساس مقدار تولید ناخالص کشاورزی شاخص C4 به ازای هر نفر و شاخص C5 مقدار آب مصرفی از تولید ناخالص محاسبه شد. شاخص C6 از تقسیم کل منابع آبی به مقدار نیاز منطقه تعریف شد. شاخص C7 برای تحلیل و بیان نسبت تأمین و تقاضای آب تالاب و در نهایت C8 بر اساس شاخص کیفی WAWQI برای تحلیل کیفیت آب تعریف شدند. لازم به ذکر است که هدف این مطالعه تأمین نیاز آب تالاب است، بنابراین در پارامترهای C1 تا C4 هرچه این مقدار کمتر باشد در واقع تالاب با بحران شدیدتری مواجه است. برای مثال هرچه منابع آب سطحی کمتر باشد تأمین نیاز آب تالاب دشوارتر است.

جدول ۳- درجه‌بندی برای شاخص‌های ارزیابی وضعیت ظرفیت برد منابع آب

Table 3- Classification for Evaluation Indicators of Water Resources Carrying Capacity				
Indicator	I (Loadable)	II (Weakly loadable)	III (Critical)	IV (Overload)
C1 (m ³ /ha)	4500-4800	4000-4500	3500-4000	3200-3500
C2 (m ³ /ha)	1200-1250	1100-1200	1000-1100	930-1000
C3 (m ³ /person)	600-650	525-600	450-525	400-450
C6 (%)	80-85	85-90	90-95	95-100
C4 (million Rials/person)	4.2- 4.8	3.6- 4.2	3- 3.6	2.4-3
C5 (m ³ /million Rials)	4500-500	5000-5500	5500-6000	6000-6500
C7 (%)	60-100	40-60	20-40	0-20
C8 (-)	0-30	30-50	50-70	70-100

شاخص ارزیابی منتخب در دوره ۱۰ ساله ۱۳۹۹-۱۴۰۰ آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل‌سازی

با توجه به مدل‌سازی سیستم منابع آب منطقه با روش پویایی سیستم در نرم‌افزار Vensim، در جدول ۴، مقادیر عددی ۸

جدول ۴- مقادیر عددی شاخص‌های ارزیابی براساس نتایج مدل پویایی سیستم

Table 4- Numerical Values of Evaluation Indicators Based on System Dynamics Model Results

Year	C1 (m ³ /ha)	C2 (m ³ /ha)	C3 (m ³ /person)	C4 (million Rials/person)	C5 (m ³ /million Rials)	C6 (%)	C7 (%)	C8 (-)
2012	4341.0	936.5	562.5	2.7	4694.9	100.0	36.7	32.8
2013	3781.1	963.9	491.2	2.8	4918.1	91.6	18.7	55.9
2014	3222.8	983.3	419.8	2.9	5140.2	81.2	11.7	45.5
2015	3277.0	1004.5	427.9	3.1	5415.7	82.6	13.5	36.5
2016	3944.2	1017.6	516.4	3.3	5657.1	95.7	43.6	39.6
2017	4714.9	1013.2	625.8	3.3	5713.7	100.0	19.7	84.0
2018	3891.5	1022.0	518.9	3.3	5566.6	94.9	23.1	53.8
2019	4085.5	1048.2	549.9	3.7	6226.5	99.2	29.5	83.8
2020	3832.9	1135.5	617.0	4.5	6437.9	94.8	39.5	86.5
2021	3289.3	1218.5	478.6	4.0	6224.8	84.9	15.4	68.6

وزن‌های ترکیبی با ترکیب وزن‌های AHP و آنتروپی براساس رابطه ۱۴ محاسبه شدند. بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که وزن نسبت تأمین و تقاضای آب تالاب (C7) دارای بیش‌ترین مقدار (۰/۲۰۲) است. پس از آن شاخص کیفی منابع آب ورودی به تالاب (C8)، شاخص کل منابع آب بر جمعیت منطقه (C3) و شاخص مقدار تولید ناخالص کشاورزی به ازای هر نفر (C4) به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۱۴۵، ۰/۱۴۲ و ۰/۱۲۵ در رتبه‌های بعدی بودند. به‌طور کلی، وزن‌های ترکیبی نهایی به واقعیت نزدیک‌تر است، به‌دلیل اینکه روش وزن‌دهی آنتروپی، کمبودهای روش AHP را بهبود می‌بخشد تا از مشکل متفاوت شدن نتایج ارزیابی از وضعیت واقعی جلوگیری شود.

۳-۲- نتایج وزن‌دهی

برای تعیین وزن‌های اولیه که به صورت ذهنی و بر اساس نتایج نظرات کارشناسان شاغل در منطقه مورد مطالعه بود، مقادیر وزن شاخص‌های ارزیابی به روش AHP با توجه به اینکه مقدار $CR = 0.086 < 0.1$ در آزمون سازگاری محاسبه شد. در ادامه با توجه به ماتریس مقادیر اصلی شاخص‌ها از روش وزن‌دهی آنتروپی استفاده شد. نتایج دو نوع وزن و محاسبه وزن‌های ترکیبی در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در روش وزن‌دهی AHP بیش‌ترین و کم‌ترین وزن به‌ترتیب مربوط به شاخص C7 و C2 است.

جدول ۵- نتایج محاسبات وزن‌دهی

Table 5: Results of Weighting Calculations

Method	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
AHP	0.093	0.061	0.163	0.142	0.068	0.077	0.261	0.138
ENTROPY	0.119	0.104	0.121	0.109	0.111	0.136	0.144	0.155
Combined	0.106	0.083	0.142	0.125	0.090	0.107	0.202	0.145

در هر سطح ارزیابی که شامل مقادیر Ex، En و He می‌شود، در جدول ۶ آورده شده است. برای ایجاد نقشه ابر هر شاخص، تعداد قطرات ابر (N)، ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد.

۳-۳- نتایج محاسبه مقادیر WRCC با استفاده از روش ابرپیشرو

همان‌طور که ذکر شد، مقادیر شاخص‌ها با توجه به وضعیت منطقه مورد مطالعه به چهار سطح تقسیم شد. پارامترهای ابر هر شاخص

جدول ۶- پارامترهای مدل ابری WRCC در محدوده مطالعاتی فومنات

Table 6: Parameters of the WRCC Cloud Model in the Fumanat Study Area

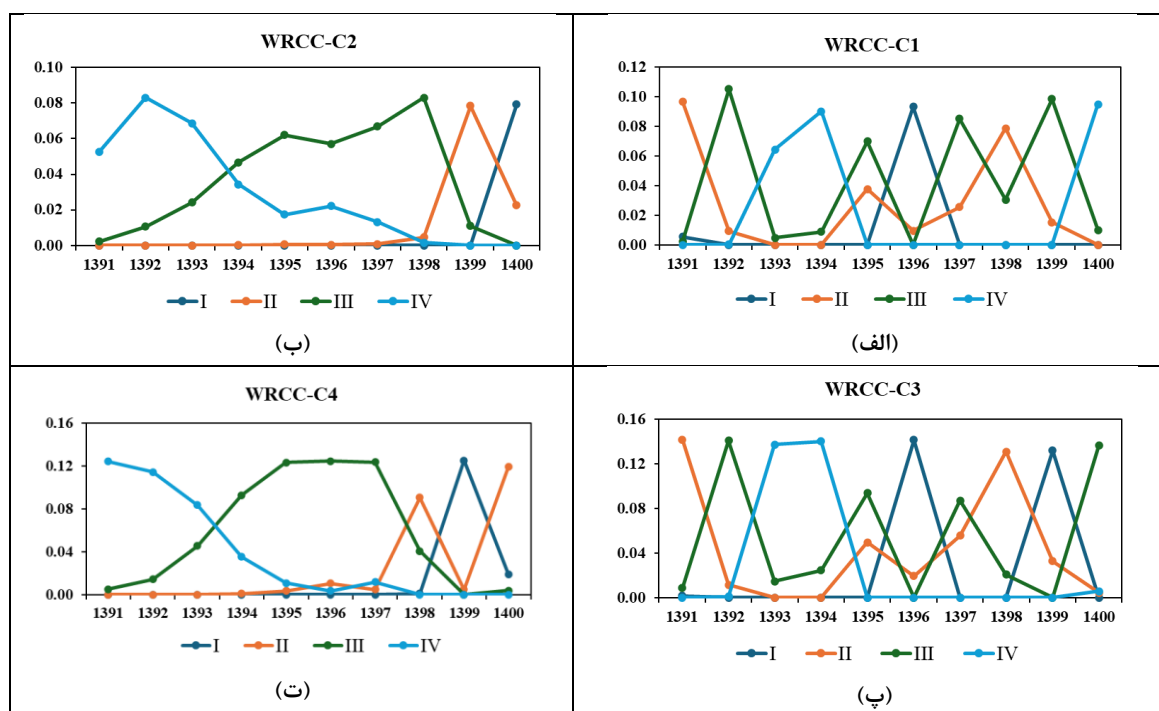
Indicator	(Ex, En, He)			
	I (Loadable)	II (Weakly loadable)	III (Critical)	IV (Overload)
C1	(4650,127.388,0.01)	(4250,212.314,0.01)	(3750,212.314,0.01)	(3350,127.388,0.01)
C2	(1225,21.231,0.01)	(1150,42.462,0.01)	(1050,42.462,0.01)	(965,29.723,0.01)
C3	(625,21.231,0.01)	(562.5,31.847,0.01)	(487.5,31.847,0.01)	(425,21.231,0.01)
C4	(4.5,0.254,0.01)	(3.9,0.254,0.01)	(3.3,0.254,0.01)	(2.7,0.254,0.01)
C5	(4750,212.314,0.01)	(5250,212.314,0.01)	(5750,212.314,0.01)	(6250,212.314,0.01)
C6	(82.5,2.123,0.01)	(87.5,2.123,0.01)	(92.5,2.123,0.01)	(97.5,2.123,0.01)
C7	(80,16.985,0.01)	(50,8.492,0.01)	(30,8.492,0.01)	(10,8.492,0.01)
C8	(80,16.985,0.01)	(50,8.492,0.01)	(30,8.492,0.01)	(10,8.492,0.01)

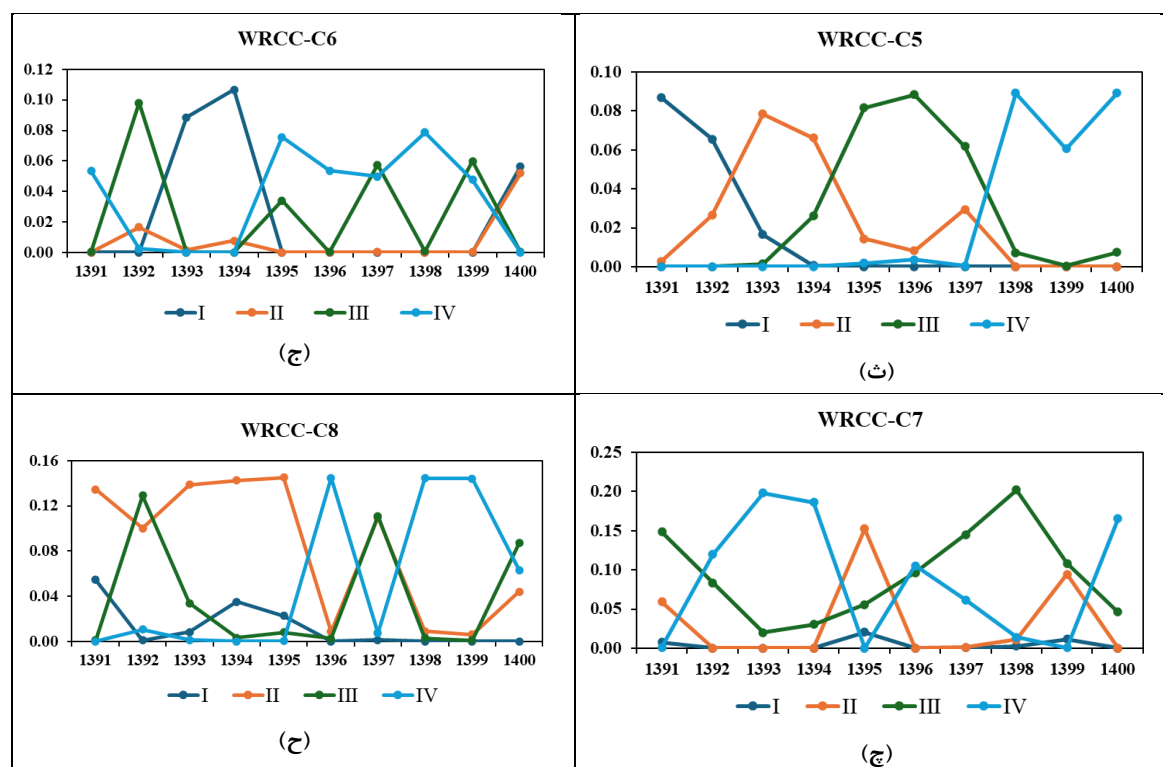
ارزیابی در طول دوره ۱۰ سال به صورت شکل ۵ آورده شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده شکل ۵، سطح هر شاخص در هر سال مشخص می شود که با توجه به آن نقش هر شاخص در تعیین ظرفیت برد نهایی تالاب تعیین می شود.

پس از محاسبه درجه عضویت هر شاخص در هر سطح، با توجه به وزن های ترکیبی محاسبه شده هر یک از شاخص ها، مقادیر WRCC در یک دوره ۱۰ ساله در سطح های مختلف به دست آمد. در جدول ۷ مقادیر نهایی WRCC آورده شده است. برای ارزیابی نقش شاخص های مختلف در تعیین درجه ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی، هر یک از شاخص ها در سطوح مختلف

جدول ۷- نتایج ارزیابی WRCC در تالاب انزلی
Table 7- WRCC Assessment Results in Anzali Wetland

Year	I	II	III	IV	Evaluation results
2012	0.157	0.435	0.168	0.232	II
2013	0.067	0.164	0.582	0.332	III
2014	0.113	0.219	0.145	0.554	IV
2015	0.143	0.218	0.233	0.486	IV
2016	0.043	0.404	0.529	0.106	III
2017	0.235	0.057	0.370	0.334	III
2018	0.002	0.228	0.738	0.144	III
2019	0.004	0.325	0.388	0.328	III
2020	0.269	0.232	0.279	0.253	III
2021	0.155	0.242	0.291	0.418	IV





شکل ۵- مقادیر شاخص‌های مختلف در ارزیابی WRCC تالاب انزلی در سطح‌های مختلف ارزیابی (الف) شاخص C1، (ب) شاخص C2 (پ) شاخص C3 (ت) شاخص C4 (ث) شاخص C5 (ج) شاخص C6 (چ) شاخص C7 (ح) شاخص C8.

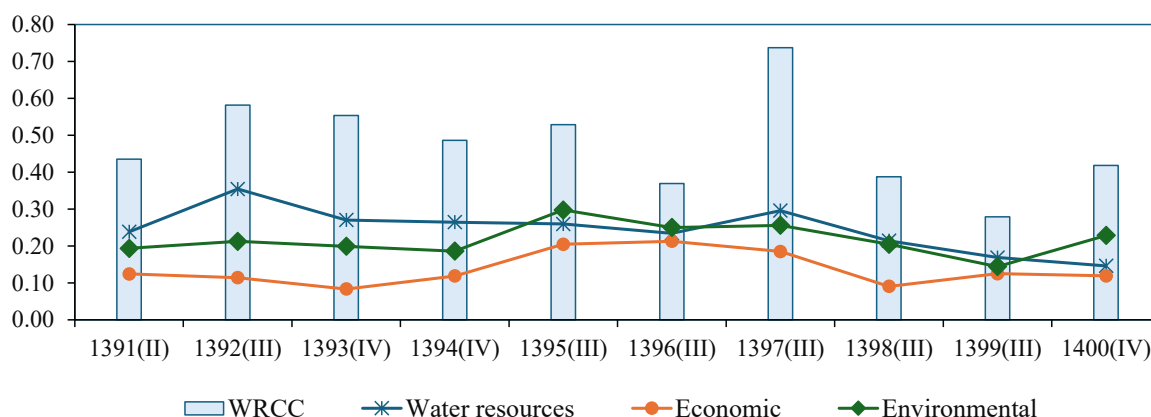
Figure 5 - Comparison of the values of various indices in the evaluation of WRCC for Anzali Wetland at different assessment levels (a) Index C1, (b) Index C2, © Index C3, (d) Index C4, (e) Index C5, (f) Index C6, (g) Index C7, (h) Index C8.

این نکته به این معناست که در این سال، تالاب انزلی از نظر منابع آب دارای وضعیت نسبتاً خوبی بود.

برای ارزیابی جزئی‌تر، درجه ظرفیت بردهای هر یک از زیرسیستم‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶). ارزیابی ظرفیت برد هر یک از زیرسیستم‌های منابع آب، اقتصادی و محیط‌زیست نشان داد که در این سال، درجه ظرفیت برد زیرسیستم‌های منابع آب III (بحرانی)، اقتصادی I (قابل بارگیری) و محیط‌زیست IV (فوق بحرانی) بود. بنابراین، می‌توان به این نتیجه رسید که زیرسیستم اقتصادی عامل افزایش ظرفیت برد در هر یک از سطح‌های ارزیابی در سال ۱۳۹۹ بود.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۷، به‌طورکلی ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی از سال ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ روند کاهشی داشته و روند کلی تغییر درجه از II (ضعیف) به IV (فوق بحرانی) بود. بالاترین درجه ظرفیت برد مربوط به سال ۱۳۹۱ با درجه ظرفیت برد II (ضعیف) و پایین‌ترین درجه ظرفیت برد مربوط به سال‌های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۴۰۰ با درجه ظرفیت برد IV (فوق بحرانی) بوده و در بقیه سال‌ها، درجه ظرفیت برد III (بحرانی) بوده است.

اختلاف بین مقادیر ظرفیت برد در سطح‌های مختلف ارزیابی در سال ۱۳۹۹ کم است به‌طوری که انتخاب یک درجه ظرفیت برد دارای اختلاف معناداری با سایر درجه‌های ظرفیت برد ندارد.



شکل ۶- تغییرات زمانی ظرفیت برد منابع آب و بررسی مقادیر هر یک از زیرسیستم‌ها

Figure 6- Temporal Changes in Water Resources Carrying Capacity and Examination of Each Subsystem's Values

سال قبل، این وضعیت در تالاب به وجود آمده است. در سال ۱۳۹۵، به دلیل افزایش منابع آب سطحی و زیرزمینی جهش مثبتی در درجه ظرفیت برد مشاهده شد و وضعیت تالاب از وضعیت فوق بحرانی به وضعیت بحرانی رسید. در این وضعیت، درصد تأمین آب تالاب نسبت به سال قبل تقریباً ۳۰ درصد افزایش یافت. سال ۱۳۹۶، درجه ظرفیت برد نیز مشابه سال قبلی است اما با این تفاوت که دلیل آن بالارفتن درصد تأمین و تقاضای آب بوده که باعث افزایش سود اقتصادی شد. در حالی که در این سال با وجود منابع آب قابل توجه که بیشترین مقدار در طول دوره ۱۰ ساله است به دلیل مصرف بالای آن در بالادست تالاب انزلی، مقدار درصد تأمین آب تالاب تقریباً ۲۴ درصد کاهش یافته است. درجه ظرفیت برد سال ۱۳۹۷ در وضعیت III (بحرانی) است که نسبت به سال قبل با وجودی که مقدار منابع آب کاهش قابل توجهی داشته اما به دلیل افزایش خیلی کم درصد تأمین تالاب و بهبود تقریباً ۳۰ درصدی شاخص کیفی آب ورودی به تالاب، مقدار درجه ظرفیت برد تغییری نکرد. درجه ظرفیت برد سال ۱۳۹۸ نیز در وضعیت III (بحرانی) است که وضعیت محیط زیست در این سال دلیل اصلی وجود این شرایط در سال ۱۳۹۸ بوده است. در این سال با وجود افزایش منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش درصد تأمین و تقاضا و افزایش درصد تأمین آب تالاب، به دلیل کاهش ۳۰ درصدی شاخص کیفی منابع آب ورودی به تالاب وضعیت این سال نسبت به سال قبل بهبودی نداشته و در همان وضعیت بحرانی قرار گرفته است. سال ۱۳۹۹، درجه ظرفیت برد تالاب در وضعیت III (بحرانی) به دست آمد. در این سال کل منابع آب افزایش یافت که این افزایش علی‌رغم کاهش منابع آب سطحی به دلیل افزایش مصرف آب زیرزمینی جهت مصارف شرب و خدمات بوده است. در این سال با وجود اینکه درصد تأمین آب تالاب افزایش ۱۰ درصدی را تجربه کرده اما به دلیل کاهش شاخص کیفی آب ورودی به تالاب، درجه ظرفیت برد نسبت به

باتوجه به مقادیر نهایی ظرفیت برد منابع آب در شکل ۶، تغییرات زمانی قابل توجه ظرفیت برد در سطح‌های مختلف ارزیابی نشان می‌دهد که ظرفیت برد تالاب انزلی در طول دوره مورد مطالعه تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار گرفته است. این عوامل می‌توانند شامل تغییرات در جمعیت، فعالیت‌های اقتصادی، تغییرات اقلیمی، آلودگی و غیره باشند. با بررسی سطوح II، III و IV نشان می‌دهد که در بیش‌تر سال‌ها، ظرفیت برد تالاب انزلی در وضعیت بحرانی و فوق بحرانی قرار داشته است. این نشان‌دهنده فشارهای زیادی است که بر این تالاب وارد شده است.

تحلیل نتایج ارزیابی WRCC در تالاب انزلی نشان داد که این تالاب عمدتاً در وضعیت III (بحرانی) و IV (فوق بحرانی) قرار دارد که بیانگر این نکته است که برنامه‌ریزان منطقه بهتر است برای خروج از این وضعیت برنامه‌ریزی‌ها و راهکارهایی را اجرایی کنند. سال ۱۳۹۱، زمان شروع ارزیابی‌ها است که با توجه به نتایج WRCC، این سال در وضعیت II (ضعیف) قرار دارد. در مقایسه با سال‌های دیگر مورد ارزیابی در این مطالعه، وجود منابع آب سطحی بیش‌تر در این سال، به دلیل وضعیت ایجاد شده در سال ۱۳۹۱ است. سال ۱۳۹۲، جهش قابل‌ملاحظه‌ای از نظر ظرفیت برد مشاهده می‌شود که از وضعیت II (ضعیف) به III (بحرانی) می‌رسد که بررسی‌ها نشان داد که کاهش قابل توجه منابع آب سطحی دلیل اصلی این موضوع بود که به موازات آن درصد تأمین آب تالاب در این سال نسبت به سال قبل تقریباً ۵۰ درصد کاهش یافت. در ادامه دوباره جهش قابل‌ملاحظه‌ای از نظر ظرفیت برد در سال ۱۳۹۳ مشاهده شد طوری که WRCC به وضعیت IV (فوق بحرانی) در این سال می‌رسد. کاهش تقریباً ۱۵ درصدی منابع آب سطحی که باعث کاهش ۳۷ درصدی تأمین آب تالاب نسبت به سال قبل شد. درجه ظرفیت برد سال ۱۳۹۴ نیز در وضعیت IV (فوق بحرانی) است که تقریباً به‌دلیل مشابه

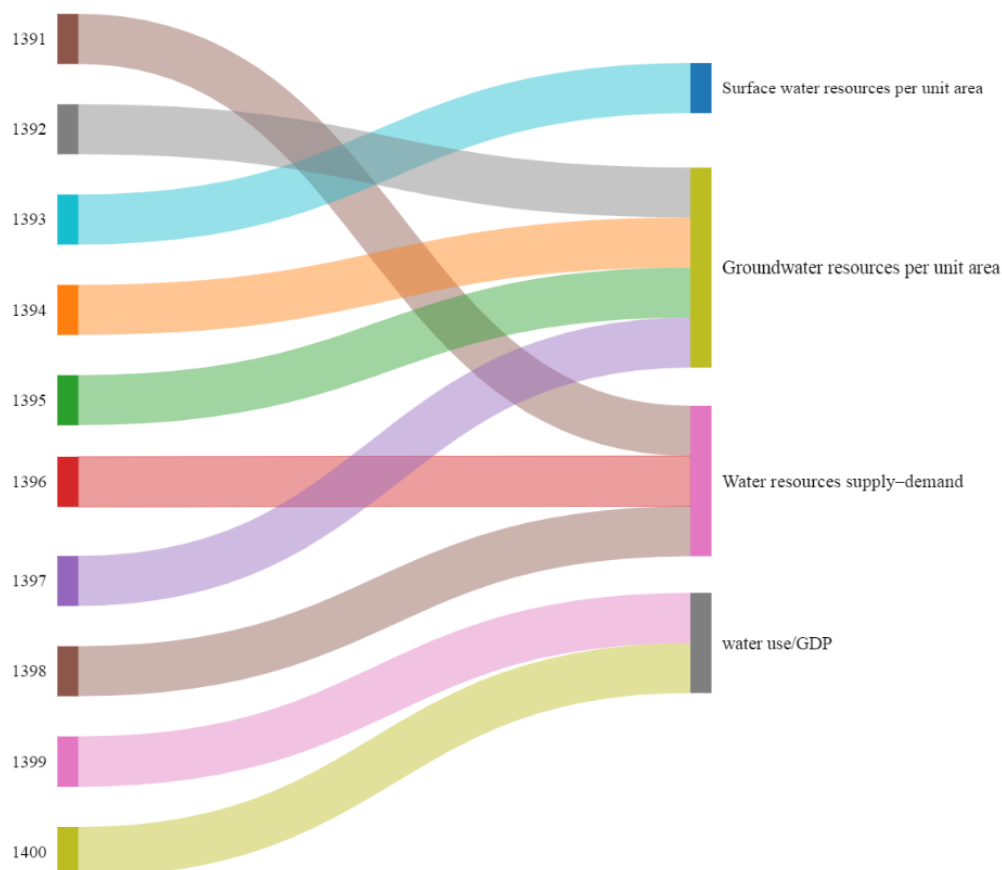
داشته باشد که آن‌ها نیز علت این موضوع را در تعریف شاخص‌ها و روش ارزیابی معرفی کردند. این مطلب بیانگر این نکته است که یافتن روش‌های علمی‌تر و واقع‌بینانه‌تر برای ارزیابی وضعیت WRCC می‌تواند در برنامه پژوهش‌های محققین در آینده قرار گیرد.

نتایج محاسبات مربوط به عوامل مانع WRCC در شکل ۷ نشان داده شده است. شاخص منابع آب زیرزمینی در دسترس بر مساحت منطقه (C2)، تکرار شونده‌ترین عامل مانع در سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۲، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۷ است. شاخص آب سطحی در دسترس بر مساحت منطقه C1 تنها در سال ۱۳۹۳ و شاخص آب مصرفی و تولید ناخالص C5 در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ عوامل مانع هستند. بعد از شاخص C2 تکرار شونده‌ترین عامل شاخص C6 نسبت عرضه بر تقاضا است.

منابع آب سطحی و زیرزمینی به‌طور قابل توجهی بر ظرفیت برد منابع آب تالاب تأثیر می‌گذارد. سه شاخص از چهار شاخص زیر سیستم منابع آب جز عوامل مانع اصلی هستند که به‌طور قابل توجهی بهبود ظرفیت برد منابع آب تالاب را محدود می‌کنند. بنابراین، با توجه به عوامل دارای موانع محیط‌زیستی بالا، اقداماتی در جهت بهبود ظرفیت برد تالاب با توجه به شرایط واقعی منطقه پیشنهاد می‌شود. این اقدامات شامل نظارت بر فرآیندهای استفاده از آب و کنترل کل مصرف آب، شتاب بخشیدن به تنظیم ساختار صنعتی و پژوهش و توسعه فناوری‌های صرفه‌جویی آب و بهبود بهره‌وری استفاده از آب است. علاوه بر این، لازم است روند تغییرات وضعیت منابع آب به موقع شناسایی شود و تخصیص بهینه منابع آب با توجه به آن انجام شود، همچنین، روند کنترل تخلیه فاضلاب بهبود یابد.

سال قبل بهبود نیافته است. لازم به ذکر است که افزایش مصرف آب زیرزمینی و کاهش کیفیت منابع آب ورودی به تالاب می‌تواند از عواقب شیوع ویروس کرونا در این سال بوده باشد. در ادامه جهش قابل توجهی از نظر درجه ظرفیت برد در سال ۱۴۰۰ مشاهده شد به این صورت که از وضعیت III (بحرانی) به وضعیت IV (فوق بحرانی) رسید. دلیل اصلی این تغییر وضعیت کاهش تقریباً ۲۵ درصدی تأمین آب تالاب بوده که به واسطه کاهش قابل توجه حجم کل منابع آب در دسترس که در اثر کاهش منابع آب سطحی به وقوع پیوست.

همان‌طور که در نتایج دیده شد روند کلی تغییرات درجه ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی بین III (بحرانی) و IV (فوق بحرانی) بود که با توجه به مقادیر اصلی داده‌های منابع آبی منطقه مورد مطالعه مطابقت دارد. با این حال ممکن است در بعضی از سال‌ها تفاوت‌هایی در نتایج ارزیابی مشاهده شود که دلیل اصلی آن تعریف شاخص‌ها و روش ارزیابی و تعیین WRCC‌ها است. Wang et al. (2022)، ظرفیت برد منابع آب استان هنان را با استفاده از روش ترکیب وزن آنتروپی بهبود یافته محاسبه کردند که نتایج ارزیابی آن‌ها نشان داد که ظرفیت برد منابع آب از سطح IV (فوق بحرانی) در سال ۲۰۰۵ به سطح II (ضعیف) در سال ۲۰۱۷ رسیده است. علاوه بر این، Yang et al. (2021) ظرفیت برد منابع آب شهر ژانگیه در چین را با استفاده از روش وزن‌دهی ترکیبی و TOPSIS محاسبه کردند که نتایج آن‌ها نشان داد که طی بازه ۱۰ ساله از ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰، WRCC وضعیتی نسبتاً پایدار و در سطح‌های III (بحرانی) و IV (فوق بحرانی) قرار دارد. نتایج بررسی‌های (Wang et al., 2022; Yang et al., 2021) نیز نشان داد که ممکن است در بعضی از سال‌ها نتایج ارزیابی با مقادیر مشاهده شده در منطقه تفاوت کمی



شکل ۷- عوامل مانع WRCC در سال‌های مورد ارزیابی
Figure 7- Obstacles to WRCC in the Evaluation Years

ظرفیت مربوط به سال ۱۳۹۱ و پایین‌ترین ظرفیت به سال‌های ۱۳۹۳، ۱۳۹۴ و ۱۴۰۰ اختصاص دارد. بررسی عوامل مانع نشان داد که منابع آب سطحی و زیرزمینی تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت برد منابع آب تالاب دارند و چندین شاخص از زیر سیستم منابع آب به‌عنوان عوامل مانع اصلی در این زمینه شناسایی شده‌اند. این عوامل محدودیت‌هایی را بر بهبود ظرفیت تالاب ایجاد می‌کنند و افزایش یا کاهش این منابع به‌ویژه تحت تأثیر شرایط محیطی و اقتصادی، بر وضعیت تالاب تأثیرگذار است. نتیجه کلی بررسی‌ها نشان می‌دهد که تالاب انزلی طی سال‌های اخیر در وضعیت‌های بحرانی و فوق بحرانی قرار دارد و لزوم برنامه‌ریزی برای بهبود وضعیت آن حس می‌شود. با توجه به عوامل مانع به‌دست آمده در این مطالعه می‌توان در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت تالاب برای رسیدن به وضعیت مطلوب‌تر حرکت کرد.

سپاسگزاری

در این بخش از همکاری و مساعدت کارکنان شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گیلان که در انجام مراحل مختلف پژوهش از جمله در اختیار قرار دادن داده، تکمیل پرسش‌نامه و غیره، قدردانی می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور ارزیابی ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی در استان گیلان با توجه به نتایج مدل‌سازی روش پویایی سیستم، یک سری شاخص‌های ارزیابی با هدف ارزیابی تالاب تعریف شد و پس از وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش ترکیبی AHP-Entropy برای تعیین درجه عضویت هر یک از شاخص‌ها از مدل ابری استفاده شد. برای تعیین وزن‌های اولیه شاخص‌های ارزیابی، از نظرات کارشناسان استفاده شده و با استفاده از روش AHP و آزمون سازگاری (CR) نتایج قابل قبولی به‌دست آمده است. سپس، وزن‌های ترکیبی با ترکیب وزن‌های AHP و آنتروپی محاسبه شدند. بیش‌ترین وزن مربوط به شاخص نسبت تأمین و تقاضای آب تالاب (C7) به‌دست آمد و شاخص‌هایی مانند کیفیت منابع آب ورودی و تأثیر تولید ناخالص کشاورزی نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. نتایج این بخش نشان داد که وزن‌های ترکیبی نهایی به‌دست آمده واقع‌بینانه‌تر هستند زیرا روش آنتروپی کمبودهای روش AHP را بهبود می‌بخشد و دقت ارزیابی را افزایش می‌دهد.

نتایج ارزیابی WRCC نشان می‌دهد که ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی بین سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ روند کاهشی داشته و ظرفیت آن از درجه II (ضعیف) به IV (فوق بحرانی) تغییر یافته است. بالاترین

References

- Ayoubikia, R., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A., & Shafiei-Sabet, B. (2018). Optimization of regional water resources allocation in sefidroud river basin by social equity approach. *Iranian Water Resources Research*. 14(5), 236-252. [In Persian].
- Avarideh, H. R., Safari, A. R., Homayouni, S., & Khazaei, S. (2015). Nearshore bathymetry using hyperspectral remotesensing. *Geospatial Engineering*, 6(1), 1-10. [In Persian]. doi: 10.magiran.com/p1364335.
- Cui, Y., Feng, P., Jin, J., & 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. doi:10.3390/e20050359.
- Deng, L., Yin, J., Tian, J., Li, Q., & Gua, S. (2021). Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in the Han River Basin. *Water* 13 (3), 249. doi:10.3390/w13030249
- Duan, Q.C., Liu, C.M., Chen, X.N., Liu, W.H., & Zheng, H.X. (2010). Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method. *Acta Geographica Sinica*. 65, 82-90. doi:10.11821/xb201001009.
- Fu, J., Zang, C., & Zhang, J. (2020). Economic and resource and environmental carrying capacity trade-off analysis in the Haihe River basin in China. *Journal of Cleaner Production*. 270, 122271. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122271.
- Fu, Q., Meng, F.X., Li, T.X., Liu, D., Gong, F.L., Osman, A., & Li, Y.T. (2016). Cloud modelbased analysis of regional sustainable water resource utilization schemes. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 9, 67-75. doi:10.3965/j.ijabe.20160905.2529.
- Eslami, Z., Janatrostami, S., Ashrafzadeh, A. (2019). Application of Modeling in Management of Water, Food and Energy Nexus. *Journal of Water and Sustainable Development*. 6(2), 1-8. [In Persian]. doi:10.22067/jwsd.v6i2.74126.
- Gerlak, A.K., House-Peters, L., Varady, R.G., Albrecht, T., Zuniga-Teran, A., de Grenade, R.R., Cook, C., & Scott, C.A. (2018). Water security: A review of place-based research. *Environmental Science & Policy* 82, 79-89. doi: 10.1016/j.envsci. 2018.01.009.
- He, L.i., Du, Y.u., Wu, S., & Zhang, Z. (2021). Evaluation of the agricultural water resource carrying capacity and optimization of a planting-raising structure. *Agricultural Water Management* 243, 106456. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106456.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

مأنده کیوانفر: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **سمیه جنت‌رستمی:** راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **افشین اشرف‌زاده:** مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری و ریاضی.

۵- منابع

- اداره کل هواشناسی گیلان، (۱۳۹۶)، <http://www.gilmet.ir>
- استانداری گیلان، (۱۳۹۶)، <http://www.gilan.ir>
- اسلامی، زینب، جنت‌رستمی، سمیه، اشرف‌زاده، افشین. (۱۳۹۸). کاربرد مدل‌سازی در مدیریت رابطه پیوندی آب، غذا و انرژی. آب و توسعه پایدار، ۶ (۲)، ۸-۱. doi:10.22067/jwsd.v6i2.74126.
- ایوبی‌کیا، رضا، جنت‌رستمی، سمیه، اشرف‌زاده، افشین، شفیی ثابت، بهنام (۱۳۹۷). بهینه‌سازی تخصیص منطقه ای منابع آب در حوضه آبریز سفیدرود با رویکرد عدالت اجتماعی. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴ (۵)، ۲۵۲-۲۳۶.
- زبردست، لعبت، و جعفری، حمیدرضا (۱۳۹۰). ارزیابی روند تغییرات تالاب انزلی با استفاده از سنجش از دور و ارائه راه‌حل مدیریتی، محیط‌شناسی، ۳۷ (۵۷)، ۵۷-۶۴
- dor: 20.1001.1.10258620.1390.37.57.7.5
- آوردیده، حمیدرضا، صفری، عبدالرضا، همایونی، سعید، و خزایی، صفا (۱۳۹۳). برآورد عمق آب‌های ساحلی به کمک تصاویر سنجش از دور فراطیفی، مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، ۶ (۱)، ۱۱-۱. doi:10.22067/jwsd.v6i2.74126.
- کیوانفر، مأنده، جنت‌رستمی، سمیه، و اشرف‌زاده، افشین (۱۴۰۴). مدل‌سازی جامع ظرفیت برد منابع آب تالاب انزلی با استفاده از روش وزندهی ترکیبی AHP-Entropy- CRITIC و مدل TOPSIS-GRA. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۶ (۱)، ۱۰۵-۱۲۶. doi:10.22059/ijswr.2024.384228.669817.
- مدبری، هادی، و شکوهی لنگرودی، علیرضا (۱۳۹۹). تعیین نیاز آبی تالاب انزلی بر اساس شاخص‌های اکولوژیکی-گردشگری در چارچوب IWRM. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱ (۱۰)، ۲۵۱۷-۲۵۰۱. doi:10.22059/ijswr.2020.303554.668633.

- uncertainty. *Journal of Software*. (11), 1583-1594. doi:10.1201/9781315366951.
- Li, M., Zheng, T.Y., Zhang, J., Fang, Y.H., Liu, J., Zheng, X.L., & Peng, H. (2019). A new risk assessment system based on set pair analysis - variable fuzzy sets for underground reservoirs. *Water Resources Management*. 33, 4997-5014. doi:10.1007/s11269-019-02390-w.
- Li, Y., & Chen, Y. (2021). Variable precondition S-type cloud algorithm: Theory and application on water resources carrying capacity assessment. *Ecological indicators*. 121, 107209 doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107209.
- Liu, Y., Gao, C., Ji, X., Zhang, Z., Zhang, Y., Liu, C., & Wang, Z. (2022). Simulation of water resources carrying capacity of the Hangbu River Basin based on system dynamics model and TOPSIS method. *Front. Journal of Environmental Sciences*. 2022, 10, 1045907. doi:10.3389/fenvs.2022.1045907.
- Lu, L., Lei, Y., Wu, T., & Chen, K. (2022). Evaluating water resources carrying capacity: the empirical analysis of Hubei Province, China 2008-2020[J]. *Ecological indicators*. 144, 109454 doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109454.
- Makropoulos, C., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K., & Butler, D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*. 12 (23), 1448-1460. doi: 10.1016/j.envsoft.2008.04.010
- Modaberi, H., Shokoohi, A. (2019). Determining Water requirement of Anzali Wetland based on Eco-Tourism Indices within the Framework of IWRM. *Soil And Water Research*. [In Persian]. doi:10.22059/ijswr.2020.303554.668633
- Mou, S., Yan, J., Sha, J., Deng, S., Gao, Z., Ke, W., & Li, S. (2020). A comprehensive evaluation model of regional water resource carrying capacity: model development and a case study in Baoding, China. *Water-Sui*. 12 (9), 2637. doi:10.3390/w12092637.
- Murgatroyd, A., & Hall, J.W. (2021). Selecting indicators and optimizing decision rules for long-term water resources planning. *Water Resources Research*. 57(5), e2020WR02811. doi:10.1029/2020WR028117.
- Peng, T., & Deng, H. (2020). Comprehensive evaluation on water resource carrying capacity in karst areas using cloud model with combination weighting method: a case study of Guiyang, southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*. 27 (29), 37057-37073. doi:10.1007/s11356-020-09499-1.
- Peng, T., Deng, H., Lin, Y., & Jin, Z. (2021). Assessment on water resources carrying capacity in karst areas by using an innovative DPESBRM concept model and cloud model. *Science of The*
- Ji, J., Qu, X., Zhang, Q., & Tao, J. (2022). Predictive analysis of water resource carrying capacity based on system dynamics and improved fuzzy comprehensive evaluation method in Henan Province. *Environmental Monitoring and Assessment*. 194 (7), 500. doi:10.1007/s10661-022-10131-7.
- Keyvanfar, M., Janatrostami, S., & 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]. doi:10.22059/ijswr.2024.384228.669817.
- Kummu, M., Guillaume, J.H.A., de Moel, H., Eisner, S., Floerke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T.I.E., & Ward, P.J. (2016). The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*. UK 6, 38495. doi:10.1038/srep38495.
- Li, D., Liu, C., Du, Y., & Han, X. (2004). Artificial intelligence with *Total Environment*. 767, 144353. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144353.
- Sachs, J.D. (2012). From Millennium Development Goals to Sustainable Development Goals. *The Lancet* 379 (9832), 2206-2211. doi:10.1016/S0140-6736(12)60685-0.
- Wang, G., Xiao, C., Qi, Z., Meng, F., & Liang, X. (2021). 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 doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107232.
- Wang, X., Liu, L., Zhang, S., & Gao, C. (2022). Dynamic simulation and comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity in Guangzhou city. *China. Ecological Indicators*. 135, 108528 doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108528.
- Wang, X.T., Yang, W.M., Xu, Z.H., Hu, J., Xue, Y.G., & Lin, P. (2019). A normal cloud modelbased method for water quality assessment of springs and its application in Jinan. *Sustainability* 11, 16. doi:10.3390/su11082248.
- Wang, Hou, Y., & Xue, Y. (2017). Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: analysis of policy optimization for urban wetland water resources management. *Journal of Cleaner Production*. 161, 1180-1191. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.204.
- Wei, X., Wang, J., Wu, S., Xin, X., Wang, Z., & Liu, W. (2019). Comprehensive evaluation model for water environment carrying capacity based on VPOSRM framework: A case study in

- Wuhan. China. *Sustainable Cities and Society*. 50, 101640 doi:10.1016/j.scs.2019.101640.
- Wu, C., Zhou, L., Jin, J., Ning, S., Zhang, Z., & Bai, L. (2019). Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model *Science of the Total Environment*. 710, 136324. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136324
- Wu, C., Zhou, L., Jin, J., Ning, S., Zhang, Z., & Bai, L. (2020). Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model. *Science of the Total Environment*. 710, 136324 doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136324.
- Wu, L., Su, X.L., Ma, X.Y., Kang, Y., & Jiang, Y.A. (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. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.319
- Xing, L., Xue, M., & Hu, M. (2019). Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy–resource–environment system: case of Wuhan City in China[J]. *Journal of Environmental Management*. 230, 474–487. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.09.065.
- Xu, Y., Ma, L., & Khan, N.M. (2020). Prediction and Maintenance of Water Resources Carrying Capacity in Mining Area-A Case Study in the Yu-Shen Mining Area. *Sustainability* 12 (18), 7782. doi:10.3390/su12187782.
- Yang, G., Dong, Z., Feng, S., Li, B., Sun, Y., & Chen, M. (2021). Early warning of water resource carrying status in Nanjing City based on coordinated development index. *Journal of Cleaner Production*. 284, 124696 doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124696.
- Yang, Z., Song, J., Cheng, D., Xia, J., Li, Q., & Ahamad, M.I. (2019). Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources carrying capacity in Xi'an city, China. *Journal of Environmental management*. 230, 221–233. doi:10.1016/j.jenvman.2018.09.085.
- Yu, C., Li, Z., Yang, Z., Chen, X., & Su, M. (2020). A feedforward neural network based on normalization and error correction for predicting water resources carrying capacity of a city. *Ecological Indicators*. 118, 106724. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106724.
- Zebardast, L., & Jafari, H. (2011). Use of remote sensing in monitoring the trend of changes of Anzali Wetland in Iran and proposing environmental management solution. *Journal of Environmental Studies*, 37(57), 1-8. [In Persian].
- dor: 20.1001.1.10258620.1390.37.57.7.5
- Zhang, B., Chen, Z.M., Zeng, L., Qiao, H., & Chen, B. (2016). Demand-driven water withdrawals by Chinese industry: a multi-regional input-output analysis. *Frontiers of Earth Science*. 10, 13–28. doi:10.1007/s11707-015-0505-8.
- Zhang, J., Zhang, C., Shi, W., & Fu, Y. (2019). Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on naturebased solutions. *Journal of Hydrology*. 568, 96–107. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.059
- Zhang, J.D., Fu, J.T., Liu, C.Y., Qu, Z.G., Li, Y.A., Li, F., Yang, Z.F., & Jiang, L.P. (2019). Evaluating water resource assets based on fuzzy comprehensive evaluation model: A case study of Wuhan city, china. *Sustainability* 11, 16. doi:10.3390/su11174627.
- Zhang, S.H., Xiang, M.S., Xu, Z., Wang, L., & Zhang, C. (2020). Evaluation of water cycle health status based on a cloud model. *Journal of Cleaner Production*. 245, 15. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118850.
- Zhao, J.; Jin, J.; Zhu, J.; Xu, J.; Hang, Q.; Chen, Y., & Han, D. (2016). Water resources risk assessment model based on the subjective and objective combination weighting methods. *Water Resour. Managment*. 2016, 30, 3027–3042. doi:10.1007/s11269-016-1328-4
- Zhao, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2021). Comprehensive evaluation and influencing factors of urban agglomeration water resources carrying capacity. *Journal of Cleaner Production* 288, 125097. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125097.
- Zheng, D., Lin, Z., & Wu, F. (2020). Measurement method of regional water resources carrying capacity based on ecological footprint. *Desalination and Water Treatment*. 187, 114–122. doi:10.5004/dwt.2020.25308.
- Zuo, Q., Guo, J., Ma, J., Cui, G., Yang, R., & Yu, L. (2021). Assessment of regional-scale water resources carrying capacity based on fuzzy multiple attribute decision-making and scenario simulation. *Ecological Indicators*. 130, 108034 doi:10.1016/j.ecolind.2021.108034.
- Zuo, Q., Zhang, Z., & Wu, B. (2020). Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in Yellow River basin based on combined weight TOPSIS model. *Water Resour Prod*. 36 (02), 1–7. doi:10.3390/w15244229
- Zyoud, S.H., Kaufmann, L.G., Shaheen, H., Samhan, S., & Fuchs-Hanusch, D. (2016). A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: integration of fuzzy AHP with fuzzy TOPSIS[J]. *Expert Systems with Applications*. 61, 86–105. doi: 10.1016/j.eswa.2016.05.016