



## Assessment of Water Resources Carrying Capacity of the River Basins Using the Simulation Approach and Index-Based Evaluation Method; Case Study: Zarrineh-Roud Basin

H. Mohammadi Sedaran<sup>1</sup>, M. Delavar<sup>2\*</sup>, and M.R. Shahbazbegian<sup>3</sup>

### Abstract

The study of impacts of human activities on the environment and the development of socio-economic systems compliant with a sustainable environment has become the center of attention in recent years due to the severe environmental destruction worldwide. Various methods have been developed to evaluate the effects of these activities on the environment and to simulate the coupling human-natural system. One of these methods is "Carrying capacity of water resources", which has been developed in the science of water resources management based on the concept of "Carrying capacity". This research applied this concept to evaluate water resources management and proposed a new framework for assessing the carrying capacity of water resources by developing previous methods, and by combining simulation, indicator-based evaluation and pressure-support factor. The research used a new approach for the carrying capacity evaluation which eliminated some challenges such as ignoring the environmental health status as well as the possibility of interchangeability between indicators. The proposed framework and approach were used for the water resources carrying capacity evaluation in the Zarrineh-roud River basin area, Iran, in the period of 1987 to 2015. The study period (1987-2015) was divided into three smaller periods; first (1987-1999), second (2000-2006) and third (2007-2015), to have proper annual and periodic analyses based on changes in evaluation indicators. The results showed that loading on water resources is in the range of water resources carrying capacity only in the first period and water resources are overloaded in the second and third periods. According to the evaluation standards, the carrying capacity of water resources and the environment health status had decreased one level in each period compared to the previous period, and eventually reached the lowest possible level in the third period. The analysis of pressure-support in water resources indicated that the pressure on water resources has increased and the ability to support water resources has decreased in each period compared to the previous period. These outcomes indicated that implemented policies in the basin have pursue rapid economic developments and have paid no attention to the ability to support water resources. Such policies did not improve the basin condition and made it much worse. Therefore, it is necessary to review the implemented policies and adopt the necessary policies as soon as possible to improve the carrying capacity of water resources. Since the results have well conformity with the realities of the basin and express the effectiveness of the implemented policies, the proposed framework can be used to review the implemented policies in other similar cases. In addition, the framework makes it possible to evaluate scenarios and predict future conditions. Also, it can evaluate the impact of different policies on basin's water resources, society, economy and the environment and be a confident base for future research.

**Keywords:** Water Resources Carrying Capacity, Pressure-Support-State Framework, SWAT, Zarrineh-Roud Basin.

Received: January 13, 2021

Accepted: August 16, 2021

## ارزیابی ظرفیت برد منابع آب حوضه‌های آبریز با استفاده از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و ارزیابی مبتنی بر شاخص؛ مطالعه موردی: حوضه آبریز زرینه‌رود

حمید محمدی سهدران<sup>۱</sup>، مجید دلاور<sup>۲\*</sup> و محمد رضا شهبازبگیان<sup>۳</sup>

### چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل تخریب شدید محیط‌زیست در سراسر جهان، بررسی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست و همچنین توسعه هماهنگ سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی با یک محیط‌زیست پایدار، کانون توجهات قرار گرفته است. روش‌های مختلفی، جهت ارزیابی تأثیرات این فعالیت‌ها بر محیط‌زیست و شبیه‌سازی سیستم جفت شده انسانی-طبیعی توسعه داده شده است. یکی از این روش‌ها، "ظرفیت برد منابع آب" است که با توسعه مفهوم "ظرفیت برد" در علم مدیریت منابع آب ایجاد شده است. این پژوهش از این مفهوم جهت ارزیابی مدیریت منابع آب استفاده کرده است؛ و با توسعه روش‌های قبلی و با تلفیق روش شبیه‌سازی، روش ارزیابی مبتنی بر شاخص و عامل تعیین کننده فشار-پشتیبانی چارچوب جدیدی را جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب ایجاد کرده است. همچنین رویکردی جهت ارزیابی ظرفیت برد اتخاذ شده است که برخی از چالش‌های موجود در این زمینه مانند عدم توجه به وضعیت سلامت محیط‌زیست و امکان تبادل‌پذیری بین شاخص‌ها را برطرف می‌کند. رویکرد اتخاذ شده و چارچوب ایجاد شده جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در حوضه آبریز زرینه‌رود در دوره ۱۹۸۷-۲۰۱۵ به کار برده شد. با توجه به روند تغییرات شاخص‌های ارزیابی و ارائه تحلیل‌های بهتر، دوره مورد بررسی، به سه دوره، دوره اول (۱۹۹۹-۱۹۸۷)، دوره دوم (۲۰۰۶-۲۰۰۰) و دوره سوم (۲۰۱۵-۲۰۰۷) تقسیم شد. ارزیابی‌ها و تحلیل‌ها هم به صورت سالانه و هم به صورت دوره‌ای انجام شد. نتایج به دست آمده حاکی از این است که بارگذاری بر منابع آب فقط در دوره اول در محدوده ظرفیت برد منابع آب بوده و در دوره‌های دوم و سوم، منابع آب بیش از حد بارگذاری شده است. براساس استانداردهای ارزیابی، ظرفیت برد منابع آب و وضعیت سلامت محیط‌زیست در هر دوره نسبت به دوره قبل یک سطح پایین‌تر آمده و در دوره سوم به پایین‌ترین سطح ممکن رسیده است. بررسی فشار-پشتیبانی منابع آب بیانگر این است که در هر دوره نسبت به دوره قبل فشار وارد بر منابع آب افزایش و توانایی پشتیبانی منابع آب کاهش یافته است. این اوامر بیانگر این است که سیاست‌های اعمال شده در حوضه، توسعه سریع اقتصادی را دنبال کرده‌اند و هیچ توجهی به توانایی پشتیبانی منابع آب نداشته‌اند. این سیاست‌ها نه تنها به بهبود وضعیت حوضه کمک نکرده بلکه شرایط آن را به مراتب بدتر کرده‌اند. بنابراین لازم است که به طور کلی در سیاست‌های اعمال شده تجدید نظر شود و هرچه سریع‌تر سیاست‌های لازم در جهت بهبود ظرفیت برد منابع آب اتخاذ شود. از آنجا که نتایج به دست آمده انطباق و همخوانی بسیار خوبی با واقعیت‌های منطقه و بیان کارایی سیاست‌های اعمال شده داشته‌اند لذا می‌تواند جهت بررسی سیاست‌ها در سایر موارد مشابه مورد استفاده قرار گیرد. به علاوه چارچوب ایجاد شده امکان ارزیابی سناریوها و پیش‌بینی شرایط آینده را فراهم می‌کند. این چارچوب همچنین می‌تواند تأثیر سیاست‌های مختلف را بر منابع آب، جامعه، اقتصاد و محیط‌زیست حوضه ارزیابی کند و بستر مطمئنی را برای تحقیقات آینده ایجاد کرده است.

**کلمات کلیدی:** ظرفیت برد منابع آب، چارچوب فشار-پشتیبانی-وضعیت، SWAT، حوضه آبریز زرینه‌رود.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۵

1- Master Student, Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [m.hamid@modares.ac.ir](mailto:m.hamid@modares.ac.ir)

2- Associate Professor, Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: [m.delavar@modares.ac.ir](mailto:m.delavar@modares.ac.ir)

3- Assistant Professor, Faculty of Geography-Spatial planning, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: Mr.shahbazbegian@modares.ac.ir

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.2.11.4](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.2.11.4)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استادیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی و آمایش سرزمین، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، رشد سریع اقتصادی و رشد انفجاری جمعیت منجر به مصرف بیش از حد منابع و آلودگی شدید محیط زیست شده که توسعه اقتصادی آن‌ها را محدود کرده یا تحت تأثیر قرار داده است (Niu et al., 2020). تجزیه و تحلیل رابطه بین منابع و محیط زیست و فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در توسعه پایدار منطقه‌ای دارد (Bao et al., 2020); زیرا نهادهای اجتماعی و عملکرد محیط زیست در این مقیاس ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند (Graymore et al., 2010). انتخاب یک روش کارآمد به یک موضوع مهم در تجزیه و تحلیل روابط بین منابع و محیط زیست و فعالیت‌های انسانی و همچنین ارائه اقدامات نظارتی مؤثر و قابل استفاده برای تحقق یک استراتژی پایدار منطقه‌ای تبدیل شده است (Bao et al., 2020). در این راستا بسیاری از مفاهیم و روش‌ها برای شبیه‌سازی سیستم جفت شده انسانی-طبیعی بر مبنای توسعه پایدار (Niu et al., 2020) و توجه به هماهنگی چندعاملی و رویکرد جامع، به جای تأکید بر فقط انسان یا طبیعت ارائه شده که یکی از این مفاهیم، "ظرفیت برد" است (Peng et al., 2016).

مفهوم ظرفیت برد به طور گسترده در رشته‌های مختلف برای بیان پایداری سیستم جفت‌شده انسان-محیط زیست مورد استفاده قرار گرفته (Zhou et al., 2019) و به پایه و اساس سیاست‌های استفاده از منابع منطقه‌ای، توسعه اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست تبدیل شده است (Guiyou et al., 2020). میزان ظرفیت برد منابع و محیط زیست<sup>۳</sup> نتیجه تعادل جنبه‌های مختلف از جمله اقتصاد، منابع و جامعه است (Guiyou et al., 2020) و به طور کلی به حد بالایی اندازه جمعیت و اقتصادی اشاره دارد که منابع و محیط زیست در یک منطقه خاص می‌توانند از آن‌ها پشتیبانی کنند، به نحوی که محیط زیست به خوبی حفظ شود و آسیبی نبیند (Niu et al., 2020). مطالعات توسعه‌ای که به طور واضح ظرفیت برد را تشخیص داده‌اند، نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند برای ارتقاء فعالیت‌های اقتصادی که سازگار با یک محیط زیست فیزیکی و اجتماعی پایدار است، مورد استفاده قرار گیرد (Carey, 1993). مطالعات ظرفیت برد منابع و محیط زیست شامل مطالعات مختلفی مانند ظرفیت برد منابع زمین<sup>۴</sup> (Tong et al., 2018; Rahmasani et al., 2020)، ظرفیت برد منابع آب (Liao et al., 2020; Wu et al., 2020)، ظرفیت برد محیط زیست<sup>۵</sup> (Weihua et al., 1992; Liu and Borthwick, 2011) و ظرفیت برد جامع منابع و محیط زیست (Zhang et al., 2019a; Chen et al., 2020) می‌باشد.

منابع آب همیشه بخش مهمی از مطالعات ظرفیت برد منابع و محیط زیست بوده (Djuwansyah, 2018) و مبحث ظرفیت برد منابع آب یکی از موضوعات مهم در مطالعات علوم آب است (Rijsberman and Van, 2000) که به‌طور ویژه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Wu et al., 2016). به دلیل پیچیدگی سیستم منابع آب و ماهیت چند جانبه و سلسله‌مراتبی عواملی که بر ظرفیت برد منابع آب تأثیر می‌گذارند، برای این مفهوم تعاریف متعددی ارائه شده است (Luo et al., 2017). تعریف پذیرفته شده در این تحقیق "حداکثر توانایی منابع آب برای پشتیبانی از مقیاس اجتماعی-اقتصادی، جمعیت و محیط زیست در یک برهه زمانی خاص است، که از فناوری قابل پیش‌بینی، اقتصادی و سطح پیشرفت جامعه به عنوان پایه، توسعه پایدار به عنوان اصل و حفظ چرخه زیست‌محیطی به عنوان شرط توسعه مناسب استفاده می‌کند،" می‌باشد (Li and Gan, 2000; Yongyong, 2007). ظرفیت برد منابع آب مفهومی است با ویژگی‌های دوگانه که شامل طبیعت و جامعه است؛ بدیهی است که این بدان معنی است که سیستمی بسیار بزرگ و در مقیاسی گسترده است که شامل فاکتورهای زیادی از جمله جمعیت، منابع، محیط زیست، جامعه، اقتصاد، فناوری و غیره است که این عوامل به صورت علت و معلولی بر هم‌کنش دارند، یکدیگر را محدود می‌کنند و نه تنها به عنوان بازخورد مثبت بلکه به عنوان بازخورد منفی نیز می‌توانند عمل کنند (Feng and Huang, 2008). در حال حاضر، بزرگترین چالش برای تحقیقات ظرفیت برد منابع آب تدوین روشی برای ارزیابی کمی از این مفهوم است که از آن بتوان برای تهیه رهنمودهای قابل اعتماد برای مدیریت منابع آب استفاده کرد (Yang et al., 2015b). به دلیل تفسیرهای مختلف، رویکردهای مختلفی جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب پدید آمده است (Liao et al., 2020); رویکردهایی مانند استفاده از چارچوب نیرومحركه- فشار- وضعیت- اثر- پاسخ<sup>۶</sup> (DPSIR) (Mou et al., 2020)، ردپای اکولوژی (Dai et al., 2013; Wang et al., 2019; Yang et al., 2015b; Wang et al., 2017; Liu et al., 2020; Xiao-qing et al., 2012)، تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (Zhang et al., 2019b)، تعادل عرضه و تقاضا (Ming, 2011; Ait-Aoudia and Xin et al., 2016)، ارزیابی جامع فازی (Berezowska-Azzag, 2016)، روش مبتنی بر "حامل-بار" (Liao et al., 2020)، تحلیل سلسله‌مراتبی (Zhang et al., 2019c) و بهینه‌سازی (Meng et al., 2018; Fu et al., 2012).

از آنجا که ظرفیت برد منابع آب طیف گسترده‌ای از عوامل را در بر می‌گیرد روش‌های ارزیابی مبتنی بر شاخص ابزار مفیدی برای این نوع ارزیابی هستند (Yang et al., 2015a) اما هنوز چالش‌های جدی در

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زرینه‌رود، بزرگترین زیرحوضه درجه ۲، حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که در موقعیت  $37^{\circ} 45'$  تا  $37^{\circ} 20'$  طول جغرافیایی و  $41^{\circ} 35'$  تا  $37^{\circ} 27'$  عرض جغرافیایی قرار دارد. رودخانه زرینه‌رود با طول نزدیک به ۳۰۰ کیلومتر یکی از مهم‌ترین و طولی‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه است (Mansouri et al., 2015). شهرهای میاندوآب، شاهین‌دژ، تکاب و سفز از کانون‌های مهم شهری این حوضه هستند (Babania et al., 2019). رودخانه چم‌جغاتو و خورخوره از شاخه‌های اصلی زرینه‌رود هستند که از دامنه‌های کوه‌های چهل چشمه واقع در ۴۸ کیلومتری جنوب شرقی سفز سرچشمه گرفته و در جهت شمال جریان می‌یابند و با دریافت شاخه‌های متعدد، زرینه‌رود را تشکیل می‌دهند (شکل ۱).

### ۲-۲- روش‌شناسی

همانطور که گفته شد در این پژوهش از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و روش ارزیابی مبتنی بر شاخص جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب حوضه آبریز زرینه‌رود در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵ استفاده شده است. فرآیند ارزیابی ظرفیت برد منابع آب با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی و روش ارزیابی مبتنی بر شاخص در شکل ۲ نشان داده شده است که این فرآیند شامل ۵ مرحله اصلی است؛ در مرحله اول به بررسی سیستم منابع آب حوضه آبریز زرینه‌رود (با تمرکز بر بخش کشاورزی) در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵ پرداخته شده است، در این مرحله شبیه‌سازی بخش کشاورزی و منابع آب با استفاده از مدل SWAT<sup>۸</sup> انجام شد و همچنین جمعیت حوضه و نیازهای صنعت، شرب و خدمات و انتقال‌های بین حوضه‌ای محاسبه گردید؛ در مرحله دوم شاخص‌های مورد نیاز جهت محاسبه ظرفیت برد با استفاده از چارچوب فشار-پشتیبانی- وضعیت استخراج شد و پس از تعیین وزن شاخص‌ها، شاخص‌های تجمعی برای هر زیرسیستم و شاخص جامع ارزیابی ظرفیت برد منابع آب محاسبه گردید؛ در مراحل سوم روند تغییرات شاخص‌های ارزیابی و شاخص‌های تجمعی مورد بررسی قرار گرفته است و تغییرات این شاخص‌ها با شرایط واقعی حوضه مقایسه شد (با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی)؛ در مراحل چهارم تصمیم‌گیری نهایی برای ارزیابی ظرفیت برد منابع آب با اولویت قرار دادن محیط زیست انجام شد؛ در مرحله پنجم به بیان وضعیت سیستم در دوره تاریخی با استفاده از استانداردهای ارزیابی و تحلیل وضعیت سیستم با استفاده از حالت‌های مختلف اتصال فشار- پشتیبانی پرداخته شده است.

ارزیابی‌های مبتنی بر شاخص وجود دارد (Wu and Hu, 2020)؛ به عنوان مثال 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 ظرفیت برد منابع آب دارند (Yang et al., 2015a). بنابراین در این پژوهش از چارچوب فشار- پشتیبانی- وضعیت<sup>۹</sup> (PSS) جهت انتخاب شاخص‌های ارزیابی استفاده شده است. این چارچوب به طور مستقیم بر روی تجزیه و تحلیل تأثیر فشار- پشتیبانی متمرکز است که هسته اصلی ارزیابی ظرفیت برد منابع آب می‌باشد؛ همچنین تأثیر تعیین‌کننده وضعیت سلامت محیط زیست بر ظرفیت برد منابع آب را در نظر می‌گیرد، عاملی که اغلب در روش‌های دیگر به اندازه کافی مورد توجه قرار نمی‌گیرد (Yang et al., 2014a). علاوه بر این، این چارچوب با بهره‌گیری از معیارهای متنوع، نسبت به روش‌هایی که از یک شاخص مرکب استفاده می‌کنند قابل اعتمادتر است (Yang et al., 2015a). مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی ظرفیت برد منابع آب که از این چارچوب استفاده کرده‌اند (Yang et al., 2014b; al., 2015a; Yang et al., 2014b) غالباً متکی به کاربرد داده‌های مشاهداتی جهت برآورد و تحلیل وضعیت سیستم‌های منابع آبی هستند. این مسأله به خصوص در شرایط کمبود داده‌های مشاهداتی، به عنوان یک محدودیت جدی در این‌گونه مطالعات تلقی می‌گردد؛ در مطالعه حاضر تلاش گردید با استفاده از ترکیب چارچوب ارزیابی مبتنی بر شاخص با یک مدل شبیه‌سازی جامع حوضه‌های آبریز بدان پرداخته شود. این رویکرد ضمن اینکه امکان استخراج و تحلیل زمانی و مکانی شاخص‌ها و ظرفیت برد حوضه در شرایط کمبود داده‌های مشاهداتی را فراهم می‌آورد، امکان سناریوسازی و تحلیل شرایط منطقه‌ای تحت سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی را نیز فراهم می‌کند. این پژوهش با توسعه روش‌های قبلی و با تلفیق روش شبیه‌سازی، روش ارزیابی مبتنی بر شاخص و عامل تعیین‌کننده فشار- پشتیبانی، چارچوب جدیدی جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب ایجاد کرده است و همچنین رویکردی جهت ارزیابی ظرفیت برد اتخاذ کرده است که بسیاری از چالش‌های موجود در این زمینه مانند عدم توجه به وضعیت سلامت محیط زیست و امکان تبادل‌پذیری بین شاخص‌ها را برطرف می‌کند. روش‌شناسی پیشنهاد شده در این مطالعه، جهت ارزیابی وضعیت منابع آب با استفاده از مفهوم ظرفیت برد منابع آب در حوضه آبریز زرینه‌رود به کار برده شده است.

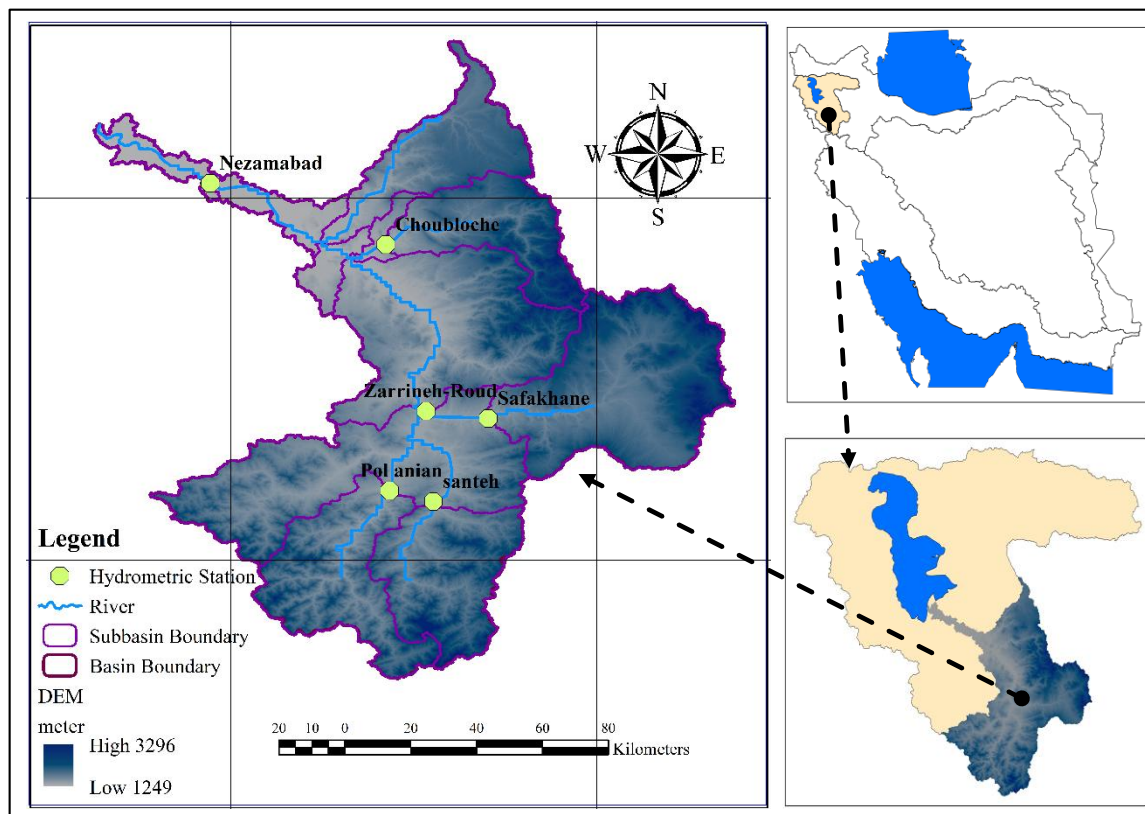


Fig. 1- The geographical location of the case study area

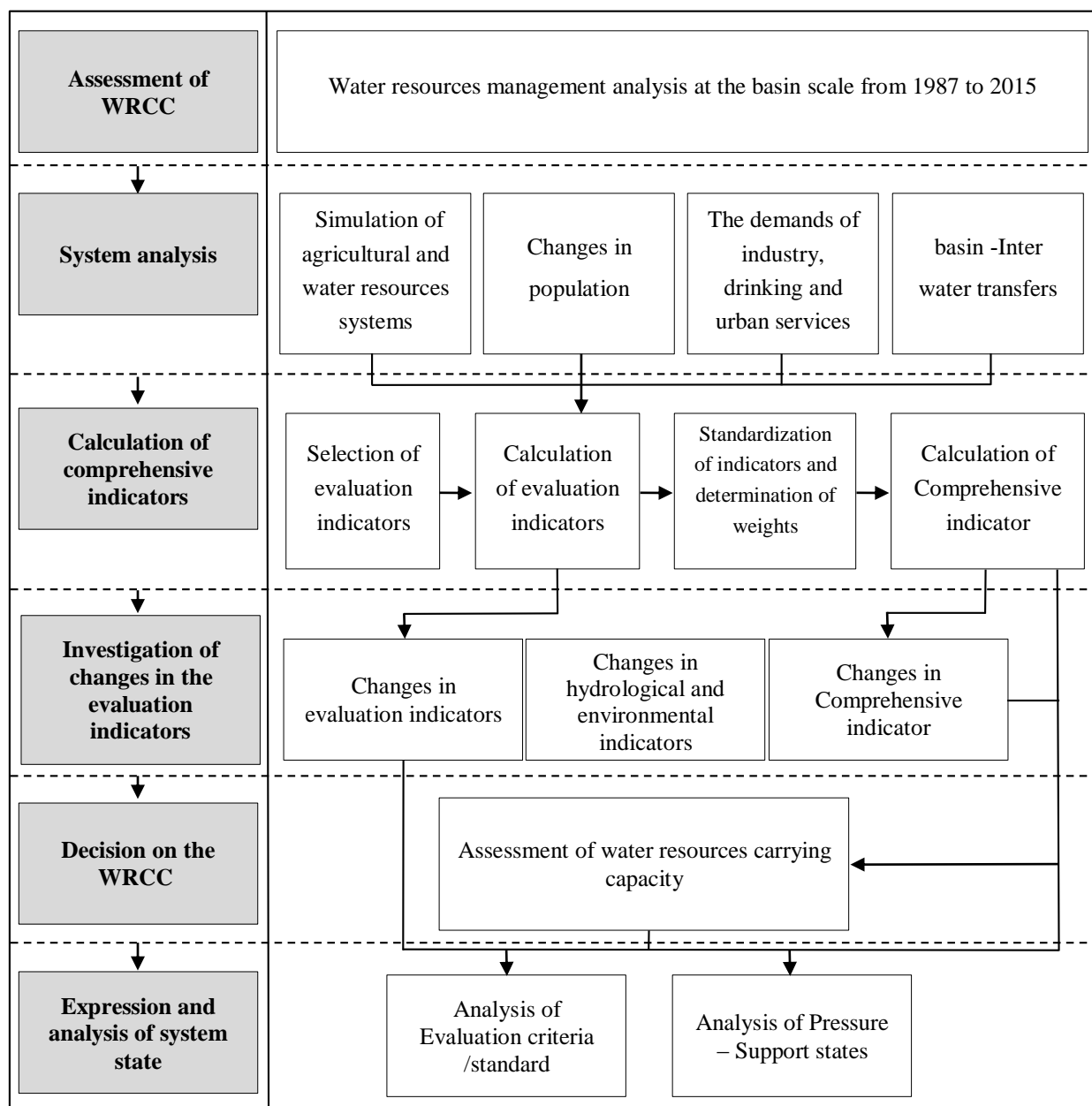
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

## ۱-۲-۲- بیان وضعیت سیستم

در گام اول فرآیند ارزیابی ظرفیت برد منابع آب، وضعیت حوضه با تمرکز بر بخش کشاورزی مورد ارزیابی قرار گرفت، این مهم با استفاده از خروجی‌های مدل مفهومی SWAT انجام شد. در این پژوهش از مدل تهیه شده توسط Delavar et al. (2019) استفاده شد که نتایج واسنجی و اعتبارسنجی آن در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ آورده شده است؛ اطلاعات مربوط به مصرف واقعی بخش کشاورزی (تبخیر)، عملکرد محصولات کشاورزی، سطح زیرکشت محصولات، تغذیه آب زیرزمینی و رواناب در واحد سطح از سال ۱۹۸۷ تا سال ۲۰۱۵ با استفاده از خروجی‌های مدل SWAT محاسبه شده‌اند. جهت محاسبه درآمد ناخالص بخش کشاورزی، از قیمت سالانه محصولات کشاورزی استفاده شد و تأثیر تورم با استفاده از شاخص قیمت مصرف‌کننده<sup>۹</sup> (CPI) حذف شده است برای محاسبه این شاخص با توجه به فرمول لاسپیترز<sup>۱۰</sup> تغییرات قیمت کالاها و خدمات در هر زمان نسبت به زمان پایه سنجیده می‌شود، به این صورت که مقدار مصرف تعیین شده برای هر یک از کالاها و خدمات در سال پایه، در قیمت جدید ضرب و هزینه جدید در زمان مورد نظر به دست می‌آید. مقادیر کالری در واحد عملکرد هر محصول نیز از سال‌نامه کشاورزی سال ۱۳۹۸ استخراج گردید.

جهت محاسبه جمعیت حوضه آبریز زرينه‌رود از آمار سرشماری نفوس و مسکن سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۸۵، ۱۳۹۰، ۱۳۹۵ و ۱۳۹۵ سازمان مرکز آمار ایران استفاده شده است (از آمار سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۷۵ به دلیل در دسترس نبودن کتابخانه دیجیتال سایت سازمان مرکز آمار ایران استفاده نشده است). نرخ رشد جمعیت بین دو دوره سرشماری ثابت در نظر گرفته شده است. محاسبه جمعیت حوضه با استفاده از میزان جمعیت شهرستان‌ها و درصد قرارگیری مساحت شهرستان در حوضه انجام شد و توزیع جمعیت در سطح شهرستان یکسان در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است نیازهای صنعت، شرب و خدمات و همچنین انتقال بین حوضه‌ای با توجه به اطلاعات موجود در گزارشات بهنگام سازی طرح جامع آب کشور (۱۳۹۵) در مدل SWAT لحاظ شده است.

با توجه به مطالعات انجام شده در طی دوره‌های نرمال هیدرولوژیکی، با توجه به میزان سالیانه تبخیر از سطح دریاچه، برای حفظ تراز آبی دریاچه ارومیه سالیانه حداقل حدود ۳/۱ میلیارد متر مکعب آب مورد نیاز است (Comprehensive management program of Urmia Lake, 2010)؛ سهم رودخانه زرينه‌رود ۴۱ درصد از این مقدار (معادل ۱۲۷۱ میلیون متر مکعب) می‌باشد (Rajabi et al., 2015).



**Fig. 2- Research methodology**

شکل ۲- روش‌شناسی انجام تحقیق

### ۲-۲-۲- محاسبه شاخص‌های تجمعی

همانطور که گفته شده در این پژوهش شاخص‌های ارزیابی ظرفیت برد منابع آب با استفاده از چارچوب فشار- پشتیبانی- وضعیت انتخاب شده‌اند، جزئیات این چارچوب در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است، به دلیل اینکه این پژوهش بر ارزیابی ظرفیت برد منابع آب تمرکز دارد، فقط مباحث مربوط به کمیت منابع آب مورد توجه قرار داده شده است. شاخص‌های انتخاب شده بر اساس این چارچوب در جدول ۴ آورده شده است.

جهت تعیین میزان جریان ورودی از حوضه زرينه‌رود به دریاچه ارومیه، در دوره ۱۹۹۳-۲۰۱۵، از داده‌های مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد و در دوره ۱۹۹۲-۱۹۸۷ از خروجی‌های مدل SWAT استفاده شده است. جهت برآورد نیاز زیست‌محیطی فقط نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه مدنظر قرار داده شده است و از نیاز زیست‌محیطی رودخانه صرف‌نظر شده است.

**Table 1- Calibration and validation results of discharge in stations in Zarrineh-Roud basin (Delavar et al., 2019)**

جدول ۱- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی دبی در ایستگاه‌های موجود در حوضه آبریز زرینه‌رود (Delavar et al., 2019)

Station name	Period	Calibration Period				Validation Period			
		p-factor	d-factor	R <sup>2</sup>	NS	p-factor	d-factor	R <sup>2</sup>	NS
Nezamabad	1993 – 2015	0.05	0	0.87	0.67	0.39	0.81	0.86	0.64
Choubloche	1987 – 2005	0.04	0.1	0.77	0.63	0.51	0.59	0.61	0.41
Zarrineh-Roud	1987 – 2015	0.10	0.19	0.90	0.83	0.35	0.12	0.85	0.73
Safakhane	1987 – 2015	0.08	0.18	0.85	0.72	0.61	0.13	0.74	0.70
Pol anian	1987 – 2015	0.06	0.99	0.84	0.69	0.42	0.40	0.68	0.59
Santeh	1988 – 2015	0.05	0.05	0.83	0.71	0.85	0.09	0.82	0.65

**Table 2- Values of R2 and NS for evapotranspiration and yield of crops in Zarrineh-roud river basin (Delavar et al., 2019)**

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های R<sup>2</sup> و NS تبخیر- تعرق و عملکرد محصولات در حوضه آبریز زرینه‌رود (Delavar et al., 2019)

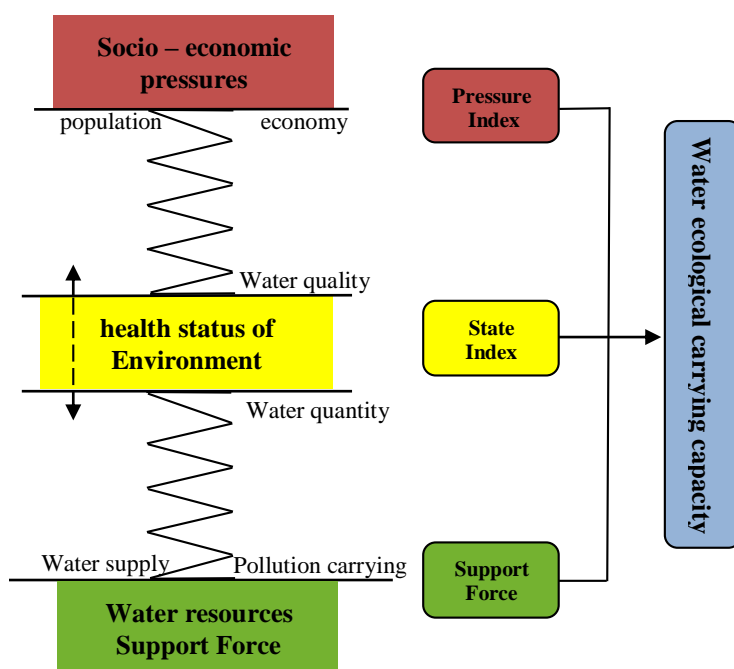
Crops		Apple	Alfalfa	Wheat	Barley	Sugar beet	Tomato	Potato
Evapotranspiration	R <sup>2</sup>	0.98	0.79	0.5	0.41	0.92	0.98	0.94
	NS	0.98	0.47	0.67	0.58	0.92	0.34	0.94
Yield	R <sup>2</sup>	0.92	0.83	0.66	0.76	0.60	0.48	0.62
	NS	0.92	0.35	0.27	0.68	0.61	0.51	0.47

در ارزیابی جامع چندشاخصه، به دلیل اینکه شاخص‌های بسیار متنوع‌اند و ابعاد متفاوتی دارند، استانداردسازی و یکسان‌سازی ابعاد شاخص‌ها امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. استانداردسازی شاخص‌های ارزیابی، هماهنگی در شاخص‌ها و اطمینان‌پذیری و شفافیت در روش‌های محاسبه و امکان مقایسه نتایج را فراهم می‌کند (Clarke, 2017). در این پژوهش جهت استانداردسازی شاخص‌های ارزیابی از معادلات ریاضی زیر استفاده شده است:

**Table 3- Results of evaluation of base flows (monthly) in the upstream stations of Zarrineh-roud river basin (Delavar et al., 2019)**

جدول ۳- نتایج ارزیابی جریان پایه (ماهانه) در ایستگاه‌های بالادست حوضه آبریز زرینه‌رود (Delavar et al., 2019)

Station name	NS	R <sup>2</sup>
Nezamabad	0.75	0.86
Safakhane	0.71	0.72
Pol anian	0.59	0.62
Santeh	0.69	0.74



**Fig. 3- PSS framework (Yang et al., 2014b)**  
شکل ۳- چارچوب PSS (Yang et al., 2014b)

**Table 4- Indicators for evaluation the carrying capacity of water resources (Yang et al., 2015a; Zhang et al., 2014)**

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی ظرفیت برد منابع آب (Yang et al., 2015a; Zhang et al., 2014)

Category	No	indicator	Unit	Indicator explanation
Pressure	1	Population density	Persons/km <sup>2</sup>	Population/Land area
	2	Income per unit area	Rial/km <sup>2</sup>	Income /Land area
	3	Calories per unit area	-	Calories /Land area
	4	Evaporation	mm	Actual water consumption of agricultural sector
Supportive force	5	River runoff per unit of land area	mm/km <sup>2</sup>	River runoff/ Land area
	6	Precipitation	mm	Reflects the annual precipitation
	7	Groundwater recharge	mm	Reflects the annual groundwater recharge
	8	Per capita water resources	m <sup>3</sup> / Persons	Total water resources/ Population
Health state	9	Inflow to the Lake Urmia	m <sup>3</sup> /s	Inflows to Lake Urmia from the Zarrineh-roud river basin

پس از استانداردسازی و تعیین وزن شاخص‌ها، شاخص‌های تجمعی برای هر زیرسیستم (فشار- پشتیبانی- وضعیت) با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه شده‌اند (Yang et al., 2015a; Du and Wang, 2021):

$$PI = \sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i \quad i = 1.2. \dots n \quad (5)$$

$$SI = \sum_{i=1}^n S_i \cdot W_i \quad i = 1.2. \dots n \quad (6)$$

$$PS = \frac{PI}{SI} \quad (7)$$

$$WECCI = (1 - PI) \times W_{PI} + SI \times W_{SI} + HSI \times W_{HSI} \quad (8)$$

PI: شاخص تجمعی فشار اجتماعی- اقتصادی؛  $P_i$  بیانگر یک شاخص فشار اجتماعی- اقتصادی؛ SI: شاخص تجمعی پشتیبانی منابع آب؛  $S_i$  بیانگر یک شاخص پشتیبانی منابع آب و  $W_i$  وزن متناظر با هر شاخص؛ PS: شاخص درجه فشار- پشتیبانی؛ WECCI: شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب؛  $W_{PI}$ : وزن شاخص تجمعی فشار اجتماعی- اقتصادی؛  $W_{SI}$ : وزن شاخص تجمعی پشتیبانی منابع آب، HSI: شاخص تجمعی وضعیت سلامت محیط زیست؛  $W_{HSI}$ : وزن شاخص تجمعی وضعیت سلامت محیط زیست (وزن هر سه مؤلفه فشار اجتماعی- اقتصادی، پشتیبانی منابع آب و وضعیت سلامت محیط زیست یکسان در نظر گرفته شده است).

به دلیل این که در این پژوهش، هدف اصلی در زیرسیستم وضعیت سلامت محیط زیست، تأمین حقایق دریاچه ارومیه است برای زیرسیستم وضعیت سلامت محیط زیست فقط از یک شاخص استفاده شد که آن، تأمین حقایق دریاچه ارومیه است و چون فقط از یک شاخص استفاده شده است، شاخص تجمعی برای این زیرسیستم محاسبه نمی‌شود.

(۱) شاخص‌های مثبت:

$$X_I = \frac{X_i^* - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

(۲) شاخص‌های منفی:

$$X_I = \frac{X_{\max} - X_i^*}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

در این معادلات،  $X_I$ : مقدار استانداردسازی شده شاخص؛  $X_i^*$ : مقدار واقعی شاخص؛  $X_{\max}$ : حداکثر مقدار شاخص در دوره مورد بررسی؛  $X_{\min}$ : حداقل مقدار شاخص در دوره مورد بررسی است.

گام بعدی در محاسبه شاخص‌های تجمعی تعیین وزن شاخص‌ها در هر زیر سیستم است. برای وزن‌دهی به شاخص‌ها روش‌ها متعددی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، روش وزن‌دهی آنتروپی می‌باشد که به دلیل عینیت و دقت بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Kang et al., 2019). در این روش هر چه میزان تغییرات بین واحدهای ارزیابی بیشتر باشد، شاخص اطلاعات بیشتری را داراست و بر این اساس وزن بیشتری می‌گیرد (Muzhikov et al., 2018). در این پژوهش از روش وزن‌دهی آنتروپی جهت وزن‌دهی به شاخص‌های ارزیابی استفاده شده است که معادلات آن به شرح زیر است:

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad j = 1.2. \dots m \quad (3)$$

$$d_j = 1 - K \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad i = 1.2. \dots n \quad (4)$$

که در این روابط،  $W_j$ : وزن هر شاخص؛  $d_j$ : مقدار فاصله هر شاخص از آنتروپی آن؛  $E_j$ : مقدار آنتروپی هر شاخص؛  $K$ : مقدار ثابتی است که باعث می‌شود مقدار آنتروپی هر شاخص بین صفر و یک باقی بماند.



### ۳-۲-۲- تصمیم‌گیری نهایی برای شاخص‌های ارزیابی ظرفیت برد منابع آب

وارد بر منابع آب و نیروی پشتیبانی منابع آب (PS) می‌باشد، بررسی شد؛ عدم تعادل در این شاخص به وضعیت پایداری محیط زیست و ظرفیت برد منابع آب در طولانی مدت آسیب وارد خواهد کرد. در این پژوهش آستانه پایداری محیط‌زیست براساس حقایق دریاچه ارومیه از حوضه زرينه‌رود محاسبه شده است که مقدار  $0.32$  در مقادیر استانداردسازی شده است؛ آستانه پایداری ظرفیت برد منابع آب  $0.4$  در نظر گرفته شده است (بر مبنای قرارگیری ظرفیت برد منابع آب در وضعیت "General carrying"، که در قسمت بعد توضیح داده شده است) و در نهایت آستانه پایداری شاخص درجه فشار- پشتیبانی برابر با  $1$  در نظر گرفته شده است. اگر تمام شرایط فوق برقرار شد ظرفیت برد منابع آب در حالت "حامل" قرار دارد و در صورت رعایت نشدن هر کدام از شروط، ظرفیت برد در حالت "بارگذاری بیش از حد" قرار می‌گیرد.

### ۴-۲-۲- بیان وضعیت سیستم

جهت بیان وضعیت سلامت محیط زیست و ظرفیت برد منابع آب از استانداردهای ارزیابی استفاده شده است. با توجه به اینکه در زیرسیستم "وضعیت" فقط از یک شاخص استفاده شده است (جریان ورودی از حوضه زرينه‌رود به دریاچه ارومیه)، استانداردهای ارزیابی وضعیت سلامت محیط زیست بر مبنای این شاخص تعریف شده‌اند.

به طور کلی نقدی که برخی از پژوهشگران به روش‌های ارزیابی جامع مبتنی بر شاخص جهت ارزیابی ظرفیت برد و مباحث مربوط به پایداری وارد دانسته‌اند، امکان تبادل‌پذیری بین شاخص‌ها است به نحوی که ممکن است مقادیر کم یک شاخص با مقادیر زیاد شاخص دیگر جبران شود. به همین دلیل در این پژوهش علاوه بر شاخص جامع، شاخص‌های مربوط به هر بخش نیز به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ این فرآیند بررسی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده و در فرآیند ارزیابی به کار برده شده در این پژوهش پایداری محیط زیست را به عنوان مهمترین اصل و اولین گام در ارزیابی ظرفیت برد منابع آب قرار داده است. پس از این که از پایداری محیط زیست (شاخص HSI) اطمینان حاصل شد فرآیند ارزیابی به مرحله ارزیابی ظرفیت برد منابع آب (شاخص WECCI) منتقل خواهد شد. با این دو گام، ارزیابی ظرفیت برد منابع آب با اولویت قرار دادن پایداری محیط‌زیست انجام می‌شود، اما با انجام این دو گام صرفاً از پایداری در کوتاه مدت اطمینان حاصل می‌شود و هیچ تضمینی برای پایداری در بلند مدت وجود نخواهد داشت. به همین دلیل یک گام دیگر نیز به فرآیند ارزیابی اضافه شد که در آن مهمترین عامل مؤثر بر پایداری محیط زیست و ظرفیت برد منابع آب، که نسبت فشار

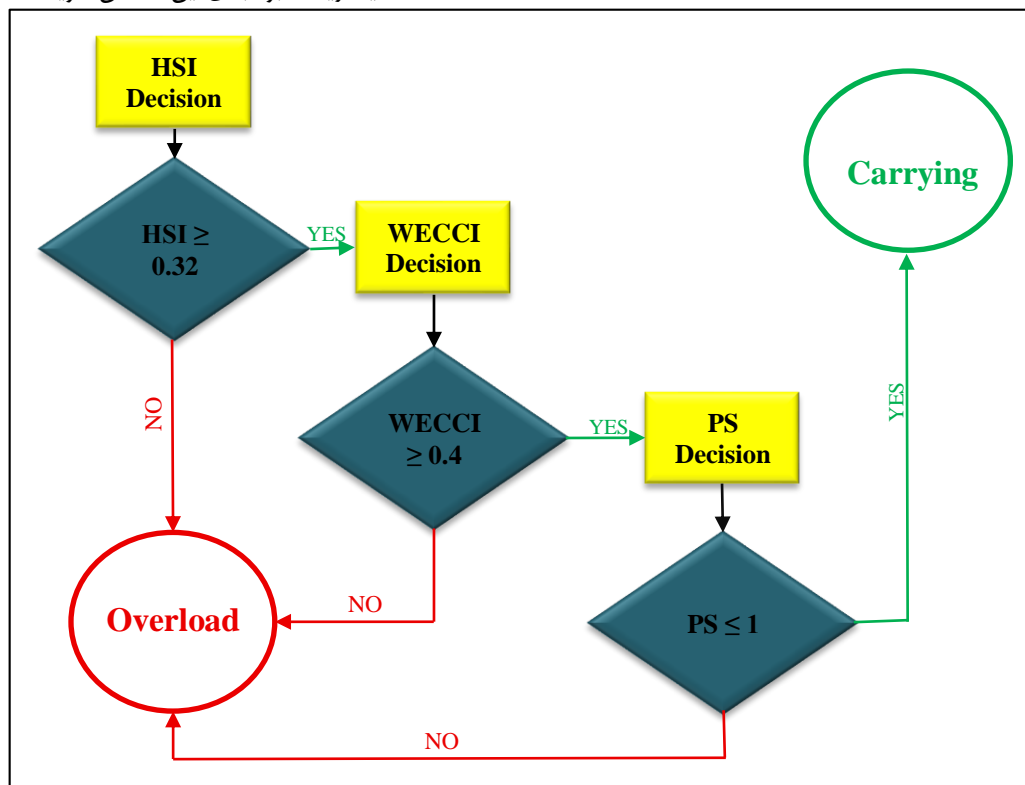


Fig. 4- Decision making process for water resources carrying capacity (Yang et al., 2015a; Zhang et al., 2014)  
 شکل ۴- فرآیند تصمیم‌گیری ظرفیت برد منابع آب (Yang et al., 2015a; Zhang et al., 2014)



با توجه به اینکه حبابه دریاچه ارومیه از حوضه زرينه‌رود سالانه حدود ۱۲۷۱ میلیون مترمکعب در سال تخمین زده شده است که معادل مقدار ۰/۳۲ در مقادیر استانداردسازی شده شاخص میزان جریان ورودی از حوضه زرينه‌رود به دریاچه ارومیه می‌باشد، بر مبنای این مقدار وضعیت سلامت محیط‌زیست به ۶ دسته تقسیم شده است (جدول ۵). همچنین با توجه به بررسی منابع (Zhang et al., 2014)، ظرفیت برد منابع آب به ۵ دسته تقسیم شد که در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به نقش مهم و تعیین‌کننده نسبت نیروی فشار به توانایی پشتیبانی در ارزیابی ظرفیت برد، که بسیاری از پژوهشگران نیز به آن توجه ویژه داشته‌اند و از آن به عنوان عامل اصلی در ارزیابی ظرفیت برد استفاده کرده‌اند (Wu and Hu, 2020; Liao et al., 2020; Du and Wang, 2021; Ait-Aoudia and Berezowska-Azzag, 2016; Ming, 2011; Shen et al., 2020; Zhu et al., 2020; Zhang et al., 2019a)؛ وضعیت سیستم منابع آب نیز بر مبنای این نسبت که در این پژوهش با شاخص درجه فشار- پشتیبانی (PI) بیان شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. براساس تعامل فشار- پشتیبانی می‌توان ۴ حالت کلی در نظر گرفت که در شکل ۵ و جدول ۶ نشان داده شده است. حالت "A" نشان‌دهنده این است که شاخص‌های فشار و پشتیبانی هر دو بالا هستند که نشان‌دهنده سطح بالایی از توسعه منابع آب منطقه‌ای است، در این شرایط باید به بهبود توانایی‌های زیرسیستم پشتیبانی توجه بیشتری شود در غیر این صورت منابع آب بیش از حد بارگذاری می‌شود؛ حالت "B" نشان‌دهنده این است که شاخص فشار بالا و شاخص پشتیبانی پایین است که بیانگر این است که به حفاظت از منابع آب توجه نشده و توسعه منابع آب پایدار نیست، در این حالت اگرچه می‌توان با توسعه و تولید با شدت زیاد، مزایا اقتصادی زیادی کسب کرد اما برای توسعه پایدار مناسب

نیست؛ در مقابل حالت "A" حالت "C" قرار دارد که نشان‌دهنده این است که شاخص‌های فشار و پشتیبانی هر دو کم هستند؛ سطح توسعه منابع آب در حالت ضعیف است و ظرفیت برد منابع آب نیز ایده‌آل نیست، در این شرایط بهترین استراتژی در مدیریت منابع آب افزایش توانایی زیرسیستم پشتیبانی، انتقال تدریجی به حالت "D" و در نهایت انتقال به حالت "A" است؛ حالت "D" نشان‌دهنده این است که شاخص فشار پایین است در حالی که شاخص پشتیبانی بالا است که نشان‌دهنده این است که پتانسیل توسعه زیادی در منابع آب وجود دارد، در این شرایط مقدار پایین شاخص فشار به دلیل تأثیر منفی آن بر توسعه اجتماعی و اقتصادی که می‌تواند منجر به هدر رفتن منابع شود، مطلوب نیست (Du and Wang, 2021).

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- تغییرات شاخص‌های ارزیابی، شاخص‌های تجمعی و شاخص‌های هیدرولوژیکی در دوره تاریخی

همانطور که گفته شد در این پژوهش از چارچوب PSS جهت انتخاب شاخص‌های ارزیابی استفاده شده است بنابراین شاخص‌های ارزیابی بر اساس سه دسته کلی فشار، پشتیبانی و وضعیت انتخاب شده‌اند. شاخص‌های دسته فشار شامل شاخص‌های تراکم جمعیت، درآمد در واحد سطح، کالری در واحد سطح و مصرف واقعی بخش کشاورزی (تبخیر) می‌باشند که به صورت سالانه محاسبه شده‌اند (شکل ۶)؛ همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است این شاخص‌ها دارای نوساناتی می‌باشند اما به طور کلی در دوره تاریخی ۲۰۱۵-۱۹۸۷ روند افزایشی داشته‌اند که بیانگر افزایش فشار وارد بر منابع آب در دوره تاریخی است.

Table 5- Evaluation standards of the water resources carrying capacity

جدول ۵- استانداردهای ارزیابی ظرفیت برد منابع آب

indicator	Grades	Standards	levels	indicator	Grades	Standards	levels
HSI	I	[0.8 - 1]	Healthy	WECCI	I	[0.8 - 1]	Excellent carrying
	II	[0.64 - 0.8]	Sub-healthy		II	[0.6 - 0.8]	Good carrying
	III	[0.48 - 0.64]	Normal		III	[0.4 - 0.6]	General carrying
	IV	[0.32 - 0.48]	Critical		IV	[0.2 - 0.4]	Poor carrying
	V	[0.16 - 0.32]	Poor		V	[0 - 0.2]	Very poor carrying
	VI	[0 - 0.16]	Extremely poor				

Table 6- Types of system status in the different pressure-support coupling states (Du and Wang, 2021)

جدول ۶- انواع وضعیت سیستم در حالت‌های مختلف اتصال فشار- پشتیبانی (Du and Wang, 2021)

Quadrant	A	B	C	D
Coupling state	High-High	High-Low	Low-Low	Low-High
Type	Advanced	Unsustainable	Weak	Potential

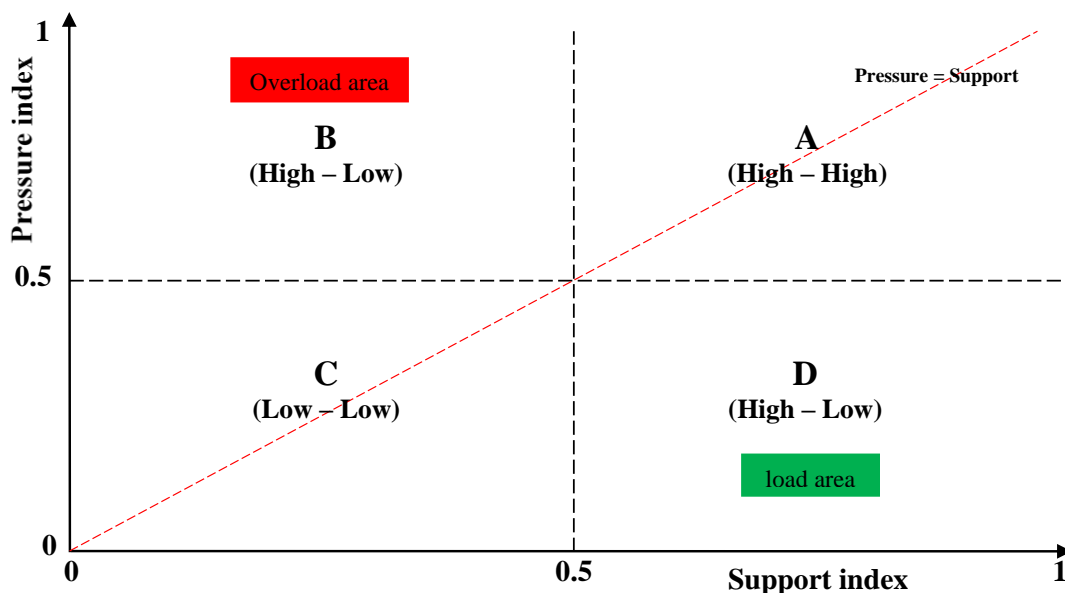


Fig. 5- Coupling states of the Pressure-Support (Du and Wang, 2021)  
 شکل ۵- حالت‌های اتصال فشار - پشتیبانی (Du and Wang, 2021)

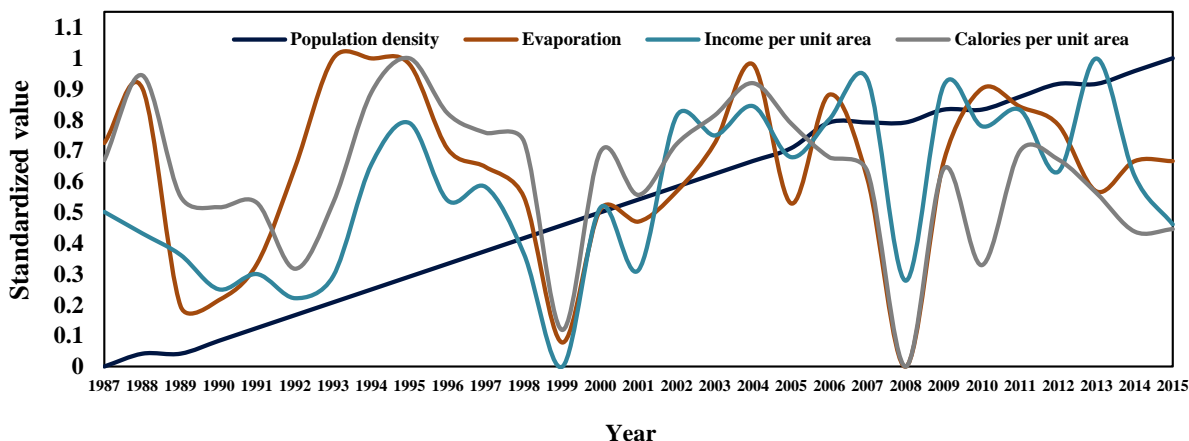


Fig. 6- Values of pressure indices in the historical period 1987 – 2015  
 شکل ۶- مقادیر شاخص‌های فشار در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵

شده است. جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زربینه رود در شکل ۸ نشان داده شده است و بیانگر این است که جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زربینه رود در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵ روند نزولی داشته است.

همانطور که گفته شد در این پژوهش جهت وزن‌دهی به شاخص‌های ارزیابی و محاسبه شاخص تجمعی در هر دسته از روش وزن‌دهی آنتروپی استفاده شده است. وزن‌های اختصاص یافته به هر شاخص از دسته فشار در شکل ۹ و هر شاخص از دسته پشتیبانی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

شاخص‌های دسته پشتیبانی شامل شاخص‌های رواناب در واحد سطح، بارش، تغذیه آب‌های زیرزمینی و سرانه منابع آب می‌باشد که به صورت سالانه محاسبه شده‌اند (شکل ۷). این شاخص‌ها نیز مانند شاخص‌های فشار دارای نواسانات سالانه می‌باشند اما به طور کلی در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵ روند نزولی داشته‌اند که بیانگر کاهش توانایی پشتیبانی منابع آب در دوره تاریخی می‌باشد.

برای دسته وضعیت، به دلیل اهمیت بسیار زیاد حوضه زربینه رود در تأمین جریان ورودی به دریاچه ارومیه (حدود ۴۱ درصد)، ارزیابی جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زربینه رود مدنظر قرار داده

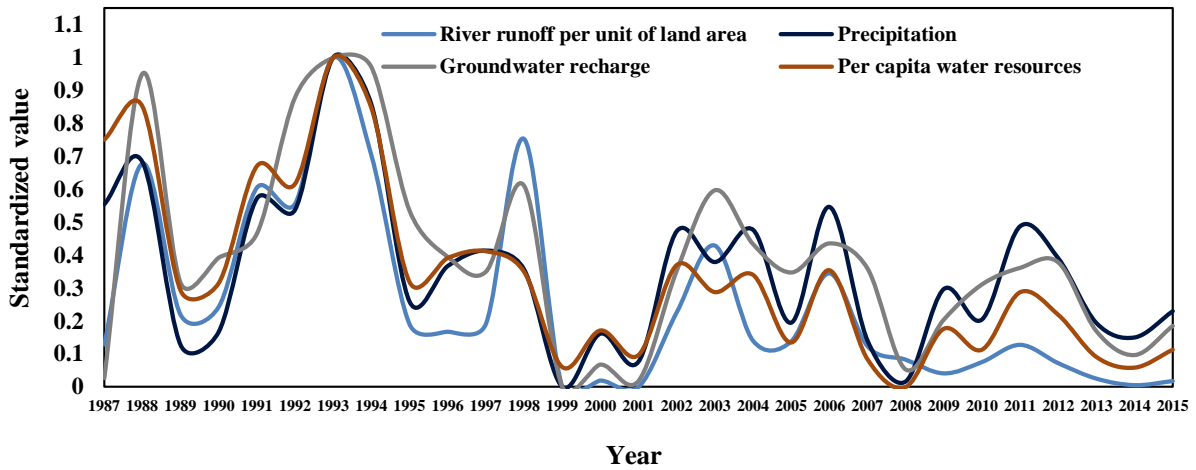


Fig. 7- Values of support indicators in the historical period 1987 – 2015

شکل ۷- مقادیر شاخص‌های پشتیبانی در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵

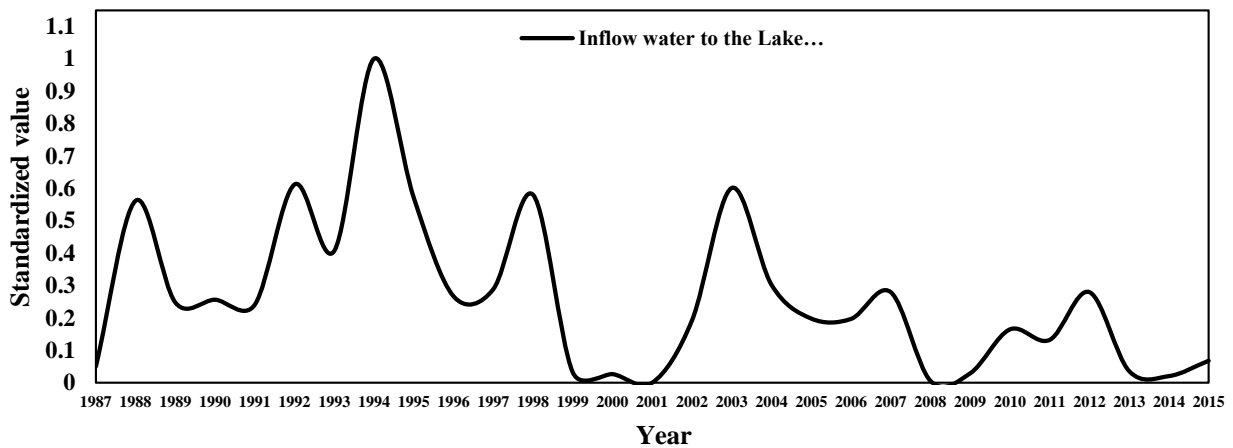


Fig. 8- Inflow to Lake Urmia from Zarrineh-roud basin in the historical period 1987– 2015

شکل ۸- میزان جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زرينه‌رود در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵

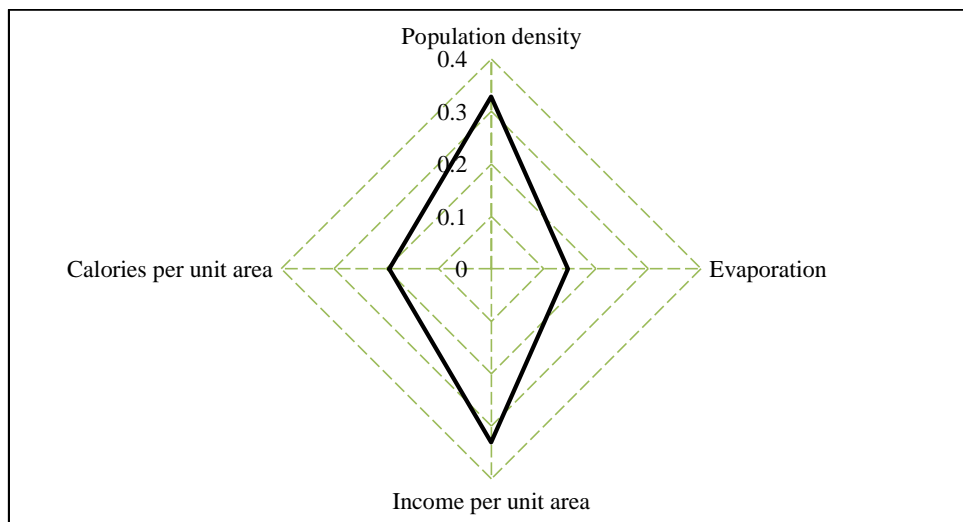
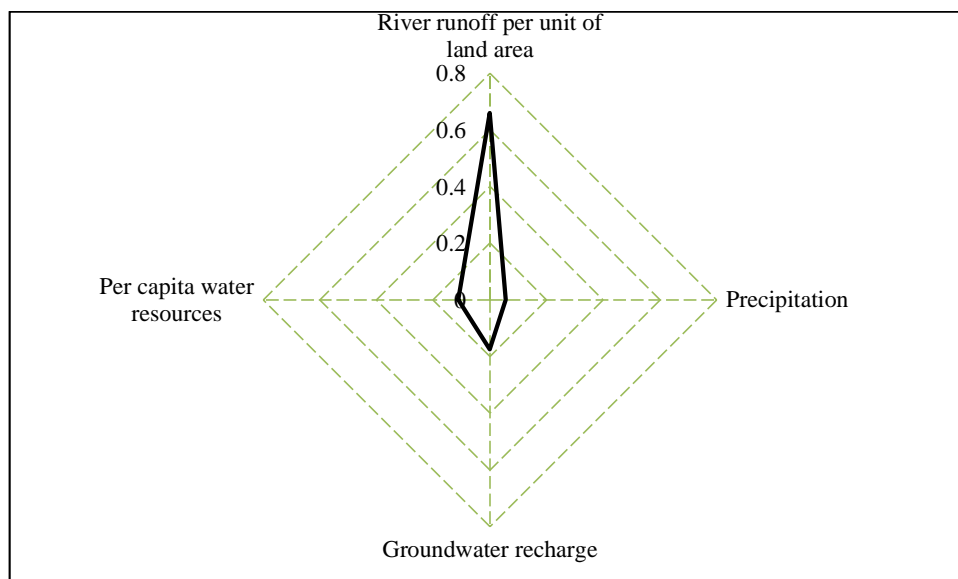


Fig. 9- Weight of pressure indicators

شکل ۹- وزن شاخص‌های فشار

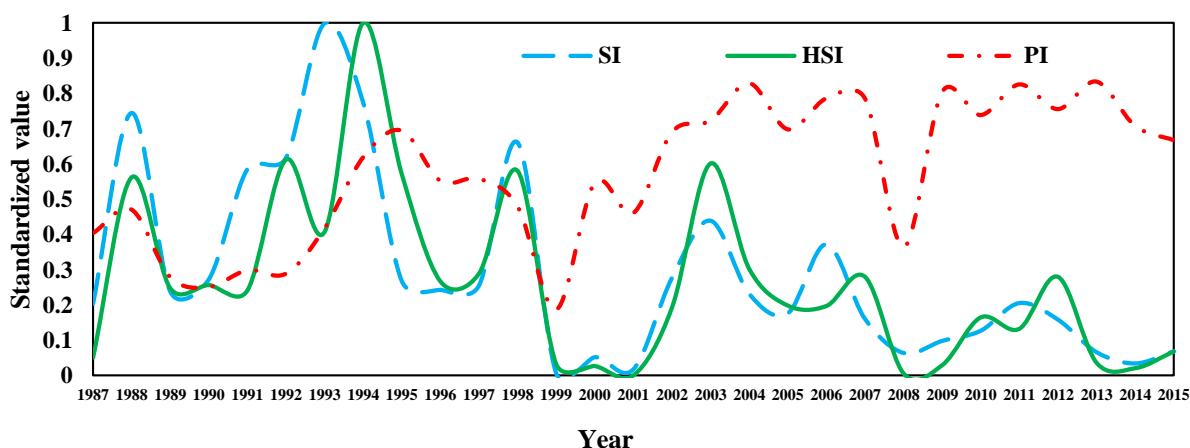


**Fig. 10- Weight of support indicators**  
**شکل ۱۰- وزن شاخص‌های پشتیبانی**

از آنجا که تغییرات شاخص‌های تجمعی فشار و پشتیبانی در دوره مورد بررسی وضعیت یکنواختی ندارند و تقریباً به صورت دوره‌ای تغییر کرده‌اند (شکل ۱۱) و همچنین طول دوره آماری مورد بررسی (۲۹ سال) برای تحلیل‌های سال به سال بسیار زیاد است (به خصوص برای تصمیم‌گیری نهایی ظرفیت برد منابع آب)، به‌علاوه پیامدهای عدم توازن در این شاخص‌ها معمولاً در همان سال و یا حتی در سال بعد مشخص نمی‌شود و با یک تأخیر زمانی اتفاق می‌افتد؛ بنابراین به نظر می‌رسد تحلیل‌های دوره‌ای نسبت به تحلیل‌های سال به سال بسیار مفیدتر و کارآمدتر باشد. بنابراین با توجه به تغییرات این شاخص‌ها، دوره آماری مورد بررسی به سه دوره، دوره اول (۱۹۸۷-۱۹۹۹)، دوره دوم (۲۰۰۰-۲۰۰۶) و دوره سوم (۲۰۰۷-۲۰۱۵) تقسیم شد.

شاخص‌های موجود در هر زیرسیستم پس از استانداردسازی و تعیین وزن، تحت عنوان شاخص‌های تجمعی فشار، پشتیبانی و وضعیت تجمیع شده‌اند. همچنین جهت بیان ظرفیت برد منابع آب از شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب استفاده شده است. تغییرات این شاخص‌ها در طول دوره تاریخی مورد بررسی (۱۹۸۷-۲۰۱۵) در شکل‌های ۱۱ آورده شده است.

همانطور که گفته شد، هدف از این پژوهش ارزیابی ظرفیت برد منابع آب با در نظر گرفتن حفظ سلامت محیط‌زیست به عنوان شرط اصلی است. مهم‌ترین عامل مؤثر بر ظرفیت برد منابع آب و وضعیت سلامت محیط‌زیست، نسبت فشار وارد بر منابع آب و توانایی پشتیبانی آن است.



**Fig. 11- Changes in the comprehensive indicators of pressure, support and status in the historical period 1987-2015**

**شکل ۱۱- تغییرات شاخص‌های تجمعی فشار، پشتیبانی و وضعیت در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵**

- تغییرات بارش و جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زربینه رود بارش مهمترین عامل تأثیرگذار بر توانایی پشتیبانی منابع است و به طور کلی در طول دوره تاریخی (۲۰۱۵-۱۹۸۷) روند نزولی داشته است. به نحوی که میانگین بارش در دوم ۵۵ میلی‌متر کمتر از دوره اول، میانگین بارش در دوره سوم ۴۱ میلی‌متر کمتر از دوره دوم و ۹۶ میلی‌متر کمتر از دوره اول است (شکل ۱۴). حوضه زربینه رود مهمترین زیر حوضه دریاچه ارومیه است و بیشترین سهم را در تأمین آب این دریاچه دارد (۴۱ درصد). به طور کلی در دوره تاریخی مورد بررسی میزان آب ورودی از حوضه زربینه رود به دریاچه ارومیه روند نزولی داشته است، به نحوی که در دوره دوم ۰/۶۸ میلیارد مترمکعب نسبت به دوره اول کاهش یافته است، دوره سوم ۰/۴۱ میلیارد مترمکعب نسبت به دوره دوم و ۱/۰۹ میلیارد مترمکعب نسبت به دوره اول کاهش یافته است (شکل ۱۴).

نسبت فشار وارد بر منابع آب و توانایی پشتیبانی آن است که در این پژوهش با شاخص درجه فشار- پشتیبانی (PS) اندازه‌گیری شده است. میانگین تغییرات این شاخص در سه دوره مورد بررسی در شکل ۱۲ آورده شده است. مقادیر میانگین شاخص‌های تجمعی فشار، پشتیبانی و شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب نیز به در سه دوره مورد بررسی محاسبه شد و نتایج آن در شکل ۱۳ آورده شده است.

افزایش نسبت فشار به پشتیبانی منابع آب (PS) (شکل ۱۲) سبب شده است که ظرفیت برد منابع آب و وضعیت سلامت محیط زیست در هر دوره کاهش قابل توجهی بیابند (شکل ۱۳)؛ بررسی پارامترهای هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در طول دوره تاریخ ۲۰۱۵-۱۹۸۷، و همچنین میانگین تغییرات آن در دوره‌های مورد بررسی بیانگر این است که بین دوره‌های مورد بررسی اختلاف‌های قابل توجهی وجود دارد. تغییرات برخی از این پارامترها به شرح زیر است:

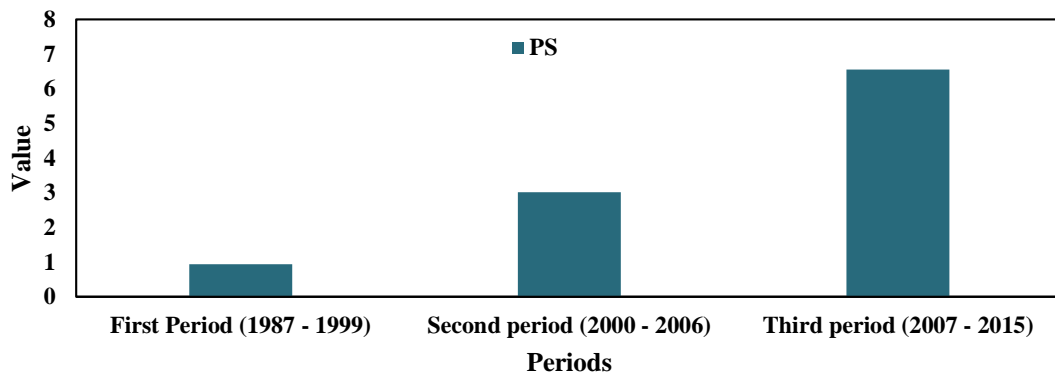


Fig. 12- Average changes of pressure-support degree indicator in the three study periods  
شکل ۱۲- میانگین تغییرات شاخص درجه فشار- پشتیبانی در سه دوره مورد بررسی

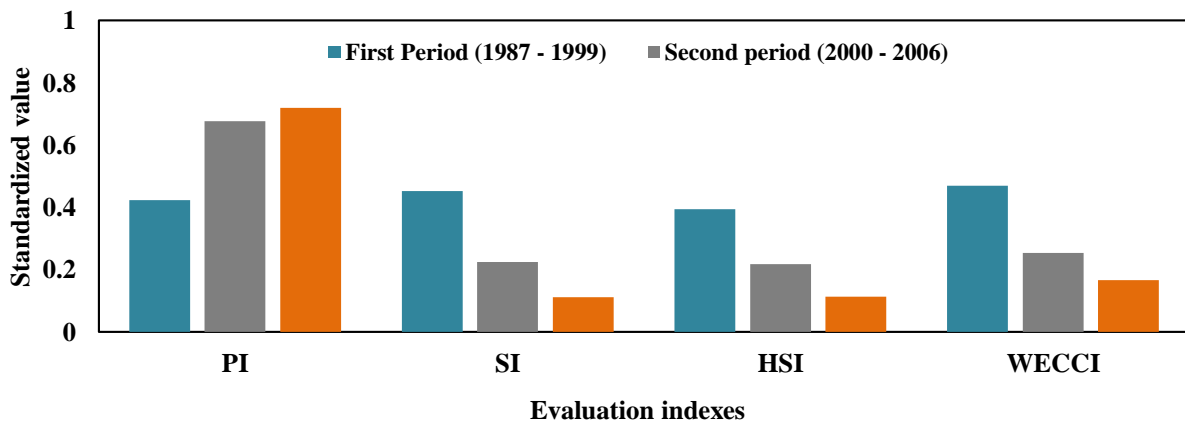


Fig. 13- Changes in the average of comprehensive indicators of pressure, support and status and comprehensive index of water resources carrying capacity in three historical periods  
شکل ۱۳- تغییرات میانگین شاخص‌های تجمعی فشار، پشتیبانی و وضعیت و شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب در سه دوره تاریخی

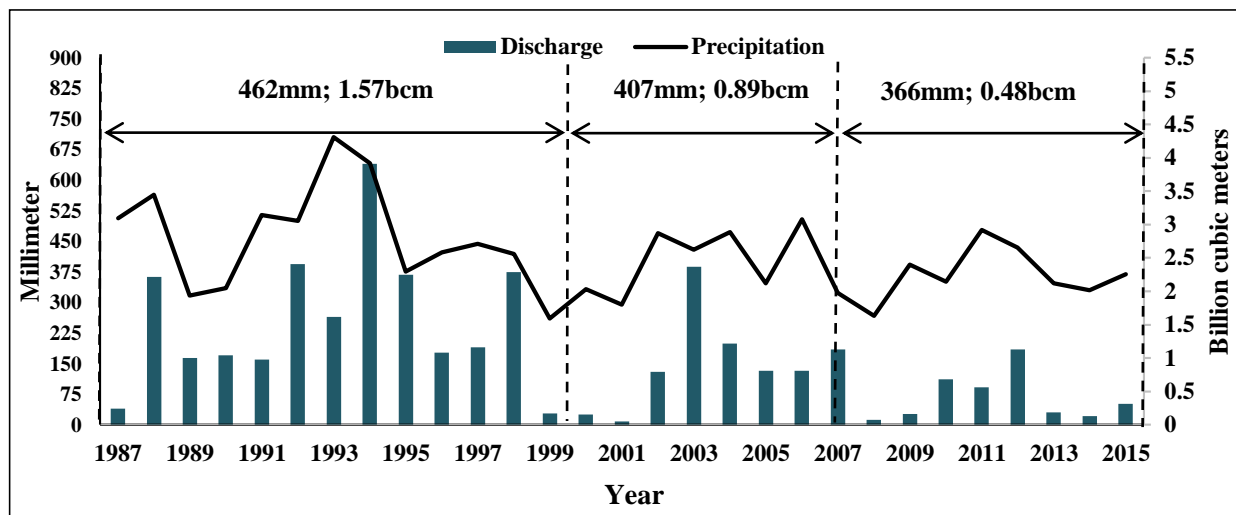


Fig. 14- Changes in rainfall and inflow to Lake Urmia from Zarrineh-roud river basin in the historical period (1987–2015) and their average in three periods

شکل ۱۴ - تغییرات بارش و جریان ورودی به دریاچه ارومیه از حوضه زربینه رود در دوره تاریخی ۲۰۱۵-۱۹۸۷ و میانگین آن‌ها در سه دوره

۰/۱۱ است که از آستانه مجاز آن ( $HSI = 0/32$ ) کمتر است. بنابراین ظرفیت برد منابع آب در این دوره نیز در وضعیت "Overload" قرار دارد.

### ۳-۳- بیان وضعیت سیستم

تجزیه و تحلیل نسبت فشار-پشتیبانی در سه دوره مورد بررسی بیانگر این است که: بین مقادیر این شاخص برای سال‌های دوره اول، پراکندگی زیادی مشاهده می‌شود (شکل ۱۵) اما به طور کلی سال‌های این دوره بیشتر در وضعیت "C" و "D" قرار دارند که بیانگر این است که هر چند توانایی پشتیبانی منابع آب در برخی از سال‌ها کم و در برخی از سال‌ها زیاد بوده است اما فشار وارد بر منابع آب در این دوره عمدتاً کم بوده است (شکل ۱۵). در مجموع این دوره در وضعیت "C" قرار می‌گیرد (شکل ۱۶). همانطور که گفته شده در حالت "C" بهترین استراتژی در مدیریت منابع آب افزایش توانایی زیرسیستم پشتیبانی، انتقال تدریجی به حالت "D" و در نهایت انتقال به حالت "A" است؛ بر خلاف این اصل، بر اساس این شاخص (فشار-پشتیبانی)، سال‌های دوره دوم و در وضعیت "B" قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). قرار گرفتن در وضعیت "B" در این دوره بیانگر این است توانایی پشتیبانی منابع آب در این دوره نسبت به دوره قبل کاهش یافته، که این کاهش توانایی بیانگر این است که در تدوین سیاست‌های مدیریتی باید توجه و حساسیت ویژه‌ای به کار برده می‌شود و سیاست‌های سازگاری با شرایط کم‌آبی در دستور کار قرار می‌گرفت و هر چه سریع‌تر می‌بایست اقدامات لازم جهت کاهش فشار بر منابع آب انجام می‌گرفت. همانطور

### ۳-۲- نتایج ارزیابی ظرفیت برد منابع آب بر اساس فرآیند اتخاذ شده

تصمیم‌گیری نهایی درباره ظرفیت برد منابع آب براساس فرآیند نشان داده شده در شکل ۴ انجام شده است. نتایج آن به تفکیک دوره‌های مورد بررسی به شرح زیر است:

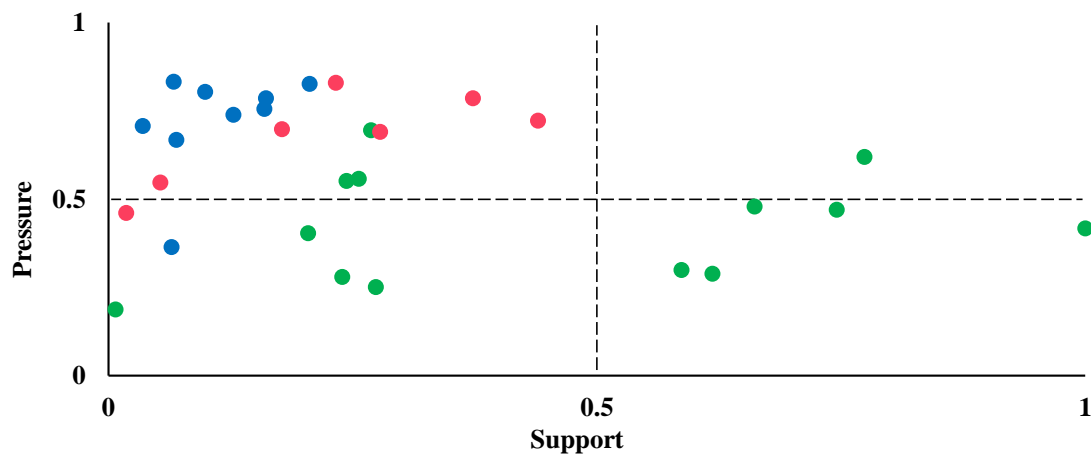
در دوره اول، مقدار شاخص سلامت محیط زیست ( $HSI$ ) که شرط اولیه و اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری ظرفیت برد منابع است برابر با  $0/39$  است که از آستانه مجاز ( $HSI = 0/32$ ) بیشتر است؛ بنابراین فرآیند تصمیم‌گیری به مرحله دوم یعنی شاخص ارزیابی جامع ظرفیت برد منابع آب ( $WECCI$ ) منتقل می‌شود، در این دوره مقدار شاخص  $WECCI$  برابر با  $0/47$  است که از حد مجاز ( $WECCI = 0/4$ ) بیشتر است؛ بنابراین فرآیند تصمیم‌گیری به مرحله آخر یعنی ارزیابی درجه فشار-پشتیبانی ( $PS$ ) منتقل می‌شود، شاخص درجه فشار-پشتیبانی ( $PS$ ) برابر با  $0/94$  است که از حد مجاز ( $PS = 1$ ) کمتر است. بنابراین در این دوره ظرفیت برد منابع آب در وضعیت "Carrying" قرار دارد.

در دوره دوم، مقدار شاخص سلامت محیط‌زیست ( $HSI$ ) که شرط اولیه و اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری ظرفیت برد منابع است برابر با  $0/22$  است که از آستانه مجاز آن ( $HSI = 0/32$ ) کمتر است. بنابراین ظرفیت برد منابع آب در این دوره در وضعیت "Overload" قرار دارد.

در دوره سوم، مقدار شاخص سلامت محیط زیست ( $HSI$ ) که شرط اولیه و اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری ظرفیت برد منابع است برابر با

در دوره دوم ۰/۶۸ میلیارد متر مکعب نسبت به دوره اول و در دوره سوم ۰/۴۱ میلیارد متر مکعب نسبت به دوره دوم و ۱/۰۹ میلیارد متر مکعب نسبت به دوره اول کاهش یافته است. این مهم بیانگر ناکارآمدی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آبی در ارتباط با زیر سیستم‌های اجتماعی و اقتصادی منطقه بوده است. به بیان دیگر سیاست‌های اعمال شده در حوضه، توسعه سریع اقتصادی را دنبال کرده‌اند و هیچ توجهی به توانایی پشتیبانی منابع آب نداشته‌اند؛ این سیاست‌ها نه تنها به بهبود وضعیت حوضه کمک نکرده بلکه شرایط آن را به مراتب بدتر کرده‌اند. بنابراین لازم است که به طور کلی در سیاست‌های اعمال شده تجدید نظر شود و هرچه سریع‌تر سیاست‌های لازم جهت کاهش فشار وارد بر منابع آب و افزایش توانایی پشتیبانی آن و در نتیجه افزایش ظرفیت برد منابع آب اتخاذ شود.

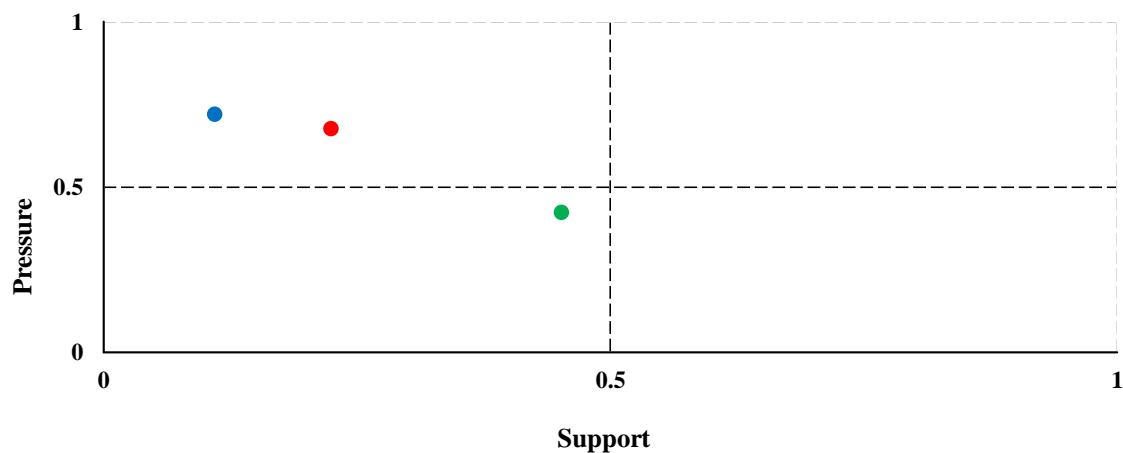
که گفته شد در حالت "B" توانایی پشتیبانی منابع آب کم و فشار وارد بر منابع آب زیاد است، که بیانگر این است که نه تنها سیاست‌های لازم جهت سازگاری شرایط کم آبی و اقدامات لازم جهت کاهش فشار بر منابع آب اعمال نشده است بلکه بالعکس اقدامات انجام شده فشار وارد بر منابع آب را به میزان قابل توجهی افزایش داده است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). این روند (کاهش توانایی پشتیبانی منابع آب و افزایش فشار وارد بر آن) در دوره سوم نیز ادامه یافته است و این دوره نیز در حالت "B" قرار می‌گیرد اما در شرایطی به مراتب بدتر از دوره دوم (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). بررسی پارامترهای هیدرولوژیکی، پیامدهای این اقدامات مدیریتی را به خوبی نشان می‌دهد، همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است جریان ورودی از حوضه زرينه‌رود به دریاچه ارومیه



● First Period (1987 - 1999) ● Second Period (2000 - 2006) ● Third Period (2007 - 2015)

Fig. 15- Values of the Pressure-Support index in the historical period (1987-2015)

شکل ۱۵- مقادیر شاخص فشار- پشتیبانی در دوره تاریخی (۱۹۸۷-۲۰۱۵)



● Second period (2000 - 2006) ● Third period (2007 - 2015) ● First Period (1987 - 1999)

Fig. 16- Average of the pressure - support index in the three study periods

شکل ۱۶- میانگین شاخص فشار- پشتیبانی در سه دوره مورد بررسی

تحقیقات منابع آب ایران، سال هفدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

Volume 17, No. 2, Summer 2021 (IR-WRR)



"General carrying" در دوره دوم در وضعیت "Poor carrying" و در دوره سوم در وضعیت "Very poor carrying" قرار دارد. نتایج به دست آمده براساس استانداردهای ارزیابی بیانگر این است که ظرفیت برد منابع آب و وضعیت سلامت محیط زیست در هر دوره نسبت به دوره قبل یک سطح پایین آمده و در دوره سوم به پایین ترین سطح خود رسیده است.

وضعیت ظرفیت برد منابع آب و وضعیت سلامت محیط زیست (به صورت سالانه) براساس استانداردهای ارزیابی در شکل های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. براساس استانداردهای ارزیابی، وضعیت سلامت محیط زیست در دوره اول در وضعیت "Critical"، در دوره دوم در وضعیت "poor" و در دوره سوم در وضعیت "Extremely poor" قرار دارد و ظرفیت برد منابع آب در دوره اول در وضعیت

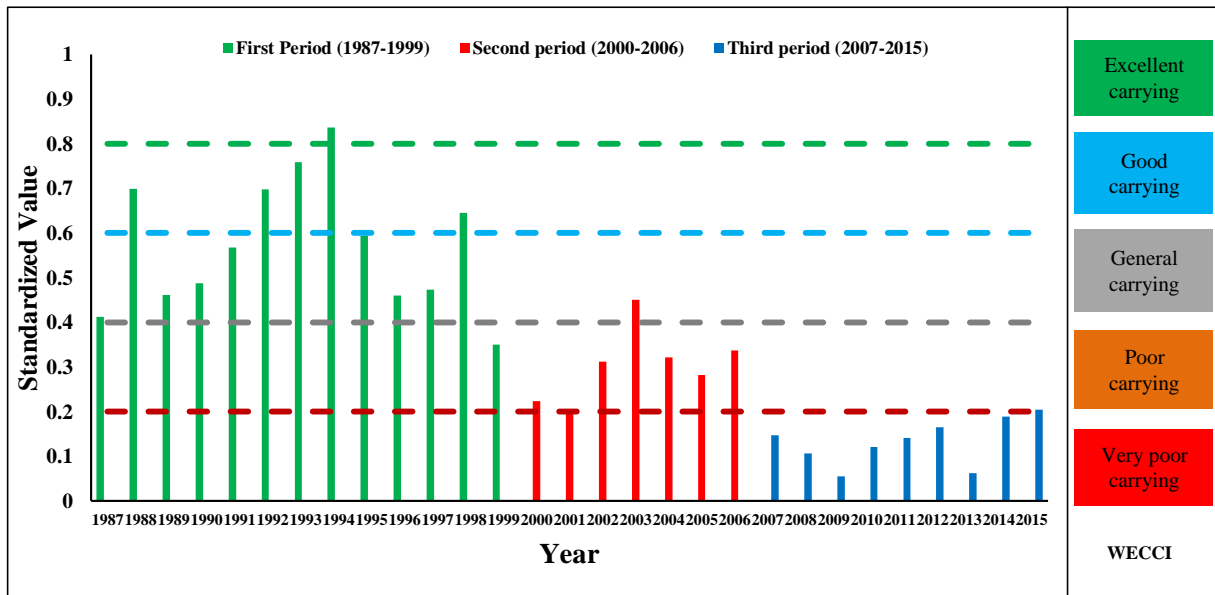


Fig. 17- Changes in the comprehensive index of water resources carrying capacity in the historical period 1987– 2015

شکل ۱۷- تغییرات شاخص جامع ظرفیت برد منابع آب در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵

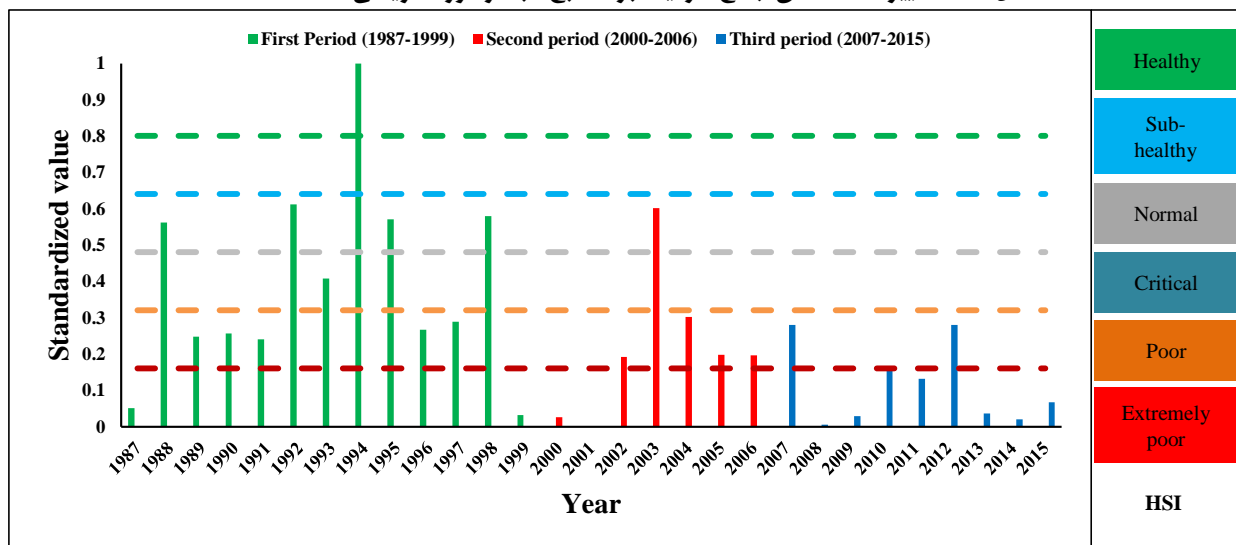


Fig. 18- Changes in environmental health state index in the historical period 1987 - 2015

شکل ۱۸- تغییرات شاخص وضعیت سلامت محیط زیست در دوره تاریخی ۱۹۸۷-۲۰۱۵

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تلاش شده است که تعریف و درک روشنی از مفهوم ظرفیت برد منابع آب در تحلیل واقع‌بینانه و جامع سیستم‌های منابع آب ارائه شود و همچنین با توسعه رویکردها و روش‌های گذشته و با تلفیق رویکردهای شبیه‌سازی (Wu et al., 2018)، روش ارزیابی مبتنی بر شاخص (Yang et al., 2015a; Yang et al., 2014b) و عامل تعیین‌کننده تعامل فشار- پشتیبانی (Du and Wang, 2021) رویکرد جدیدی جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب ارائه دهد. رویکرد پیشنهاد شده در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی تأثیر فعالیت‌های انسانی (با تمرکز بر بخش کشاورزی) بر محیط‌زیست در حوضه آبریز زرینه‌رود به کار گرفته شده است. ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در این حوضه با استفاده از رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی و روش ارزیابی مبتنی بر شاخص انجام گرفته و جهت شبیه‌سازی بخش کشاورزی از مدل مفهومی SWAT و برای انتخاب شاخص‌های ارزیابی از چارچوب فشار- پشتیبانی- وضعیت، استفاده شده است. جهت ارزیابی تغییرات ظرفیت برد منابع آب، نیز فرآیندی اتخاذ شده است که ضمن تأکید بر سلامت محیط زیست، بیان وضعیت چند وجهی سیستم در دوره تاریخی با استفاده از استانداردهای ارزیابی و حالت‌های مختلف اتصال فشار- پشتیبانی امکان‌پذیر گردد. این مهم امکان ارزیابی چندبعدی سیستم منابع آب را فراهم می‌کند و به مدیران و سیاست‌مداران کمک می‌کند که پیامدهای واقعی تصمیم‌هایشان و میزان کارایی‌شان را در عمل از جنبه‌های مختلف کاهش فشار بر منابع آب، افزایش توانایی پشتیبانی آن و بهبود وضعیت سلامت محیط زیست مورد توجه قرار دهند. در این مطالعه جهت ارائه تحلیل‌های بهتر در سطح حوضه آبریز، دوره تاریخی مورد مطالعه (۲۰۱۵-۱۹۸۷) به سه دوره، دوره اول (۱۹۹۹-۱۹۸۷)، دوره دوم (۲۰۰۶-۲۰۰۰) و دوره سوم (۲۰۱۵-۲۰۰۷) تقسیم شد. نتایج به دست آمده حاکی از این است که به طور کلی مقادیر شاخص‌های دسته فشار و در نتیجه شاخص تجمعی فشار در دوره مورد بررسی افزایش یافته و مقادیر شاخص‌های پشتیبانی و در نتیجه شاخص تجمعی پشتیبانی در دوره مورد بررسی کاهش یافته است؛ این تناقض طولانی مدت میان فشار وارد بر منابع آب و توانایی پشتیبانی آن باعث شده است که به وضعیت سلامت محیط زیست و ظرفیت برد منابع آب آسیب جدی وارد شود. بررسی پارامترهای هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی در دوره مورد بررسی نیز حاکی از وارد شدن آسیب جدی به محیط زیست می‌باشد به نحوی که جریان وارد به دریاچه ارومیه از حوضه زرینه‌رود در دوره سوم ۰/۴۱ میلیارد مترمکعب نسبت به دوره دوم و ۱/۰۹ میلیارد مترمکعب نسبت به دوره اول کاهش یافته است. همچنین نتایج به دست آمده براساس فرآیند

ارزیابی حاکی از وارد شدن آسیب جدی به ظرفیت برد منابع آب می‌باشد به نحوی که ظرفیت برد منابع آب فقط در دوره اول در وضعیت "Carrying" قرار داشته، در دوره دوم در وضعیت "Overload" قرار داشته و در دوره سوم نیز در وضعیت "Overload" قرار داشته اما با مقادیری کمتر و شرایطی بدتر از دوره دوم. مهمترین عامل مؤثر بر ظرفیت برد منابع آب و وضعیت سلامت محیط‌زیست نسبت فشار وارد بر منابع آب و توانایی پشتیبانی آن می‌باشد؛ ارزیابی‌های انجام شده براساس مقادیر این نسبت بیانگر این است که به طور کلی دوره اول در وضعیت "C" قرار دارد، در حالت "C" بهترین استراتژی در مدیریت منابع آب افزایش توانایی زیرسیستم پشتیبانی، انتقال تدریجی به حالت "D" و در نهایت انتقال به حالت "A" است؛ بر خلاف این اصل، بر اساس این شاخص (فشار- پشتیبانی)، دوره‌های دوم و سوم و در وضعیت "B" قرار دارند اما در دوره سوم شرایط به مراتب بدتر از دوره دوم است. نتایج به دست آمده براساس استانداردهای ارزیابی بیانگر این است که وضعیت سلامت محیط زیست و ظرفیت برد منابع آب در هر دوره نسبت به دوره قبل یک سطح پایین‌تر آمده و در دوره سوم به پایین‌ترین سطح خود رسیده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که سیاست‌های اعمال شده در حوضه توسعه سریع اقتصادی را دنبال کرده‌اند و هیچ توجهی به توانایی پشتیبانی منابع آب نداشته‌اند؛ بنابراین این سیاست‌ها نه تنها به بهبود وضعیت حوضه کمک نکرده بلکه شرایط آن را به مراتب نامطلوب‌تر کرده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از مطالعه حاضر و روند نامطلوب تغییرات شاخص‌های عملکردی ظرفیت برد منابع آب در حوضه، مواردی که توجه به آن‌ها مهمترین زیرساخت برای حصول پایداری سیستم‌های درهم تنیده آب، اجتماع، اقتصاد و محیط زیست و در راستای آن «کمک به احیاء دریاچه ارومیه» محسوب می‌گردند عبارتند از:

- تدوین سیاست‌ها و برنامه‌ها در حوزه آب، کشاورزی و محیط‌زیست در بستری همبسته و توجه به تبعات برنامه‌ها بر هم؛  
- تلاش در حصول به بیشترین بهره‌برداری از منابع اکولوژیکی (از جمله منابع آب) باید با توجه به ظرفیت بُرد آن دنبال گردد. ظرفیتی که می‌تواند تحت تأثیر تغییر اقلیم کمتر می‌شود و سیاست‌ها باید به سمت کاستن از این بارگذاری باشد؛

#### ۵- تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دقت نظر و راهنمایی‌های ارزنده داوران محترم و کمک‌های مهندس وحید شکرکی کوچک و مهندس علیرضا شجاعی شاهرخ‌آبادی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

- City. North China. Environmental Science and Pollution Research 26(11):11000-11011
- Delavar M, Morid S, Abbasi H, and Goli Raisi L (2019) Assessing the water saving in the measures taken in the project of “local community participation in restoration of Lake Urmia” and their effectiveness in increasing the inflow into the lake. Iranian Department of Environment, Conservation of Iranian Wetland Project, Technical Report (In Persian)
- Djuwansyah M R (2018) Environmental sustainability control by water resources carrying capacity concept: Application significance in Indonesia. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 118:1-5
- Du Y W, and Wang Y C (2021) Evaluation of marine ranching resources and environmental carrying capacity from the pressure-and-support perspective: A case study of Yantai. Ecological Indicators 126:107688
- Feng L H and Huang C F (2008) A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources. Water Resources Management 22(5):621-633
- Fu Y J, He J S, and Zhang X D (2012) Analysis of water resources carrying capacity in Liao River Basin. Applied Mechanics and Materials 212:423-429
- Graymore M L, Sipe N G, and Rickson R E (2010) Sustaining human carrying capacity: A tool for regional sustainability assessment. Ecological Economics 69(3):459-468
- Guiyou Z, Shuai L, Zhuowei J, Shuo W, and Youhua M (2020) Evaluation and forewarning management of regional resources and environment carrying capacity: A case study of Hefei City, Anhui Province, China. Sustainability 12(4):1637
- 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
- Li L Y, and Gan H (2000) Remark on the relationship between water resources rational allocation, carrying capacity and sustainable development. Advance in Water Science 11(3):307-313
- Liao X, Ren Y, Shen L, Shu T, He H, and Wang J (2020) A “carrier-load” perspective method for investigating regional water resource carrying capacity. Journal of Cleaner Production 269:122043
- Liu R Z and Borthwick A G (2011) Measurement and assessment of carrying capacity of the environment

1. Water Resources Carrying Capacity (WRCC)
2. Carrying Capacity
3. Resources and Environment Carrying Capacity
4. Land resources Carrying Capacity
5. Environmental Carrying Capacity
6. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR)
7. Pressure-Support-State (PSS)
8. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)
9. Consumer Price Index (CPI)
10. Laspeyres

## ۶- مراجع

- Ait-Aoudia M N and Berezowska-Azzag E (2016) Water resources carrying capacity assessment: The case of Algeria's capital city. Habitat International 58:51-58
- Babania F, Morid S, and Shokri A (2019) Assessment of the capacity of current agricultural water management in Zarrineh Rud Basin for adaptation to climate change using robust decision making technique. Iran-Water Resources Research 14(5):31-41 (In Persian)
- Bao H, Wang C, Han L, Wu S, Lou L, Xu B, and Liu Y (2020) Resources and environmental pressure, carrying capacity, and governance: A case study of Yangtze River Economic Belt. Sustainability 12(4):1576
- Carey D I (1993) Development based on carrying capacity: A strategy for environmental protection. Global Environmental Change 3(2):140-148
- Chen D, Zhou Q G, and Yu L (2020) Response of resources and environment carrying capacity under the evolution of land use structure in Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area. Journal of Environmental Management 274:111169
- Clarke R Y (2017) Measuring success in the development of smart and sustainable cities. Springer, Cham 239-254
- Comprehensive Management Program of Urmia Lake (2010) Joint memorandum of understanding on the conservation and sustainable management of the Lake Urmia Basin between the Environmental Protection Organization, the Ministries of Energy and Agriculture -Jahad, and the governorates of West Azerbaijan, East Azerbaijan and Kurdistan. Technical Report (In Persian)
- Dai D, Sun M, Xu X, and Lei K (2019) Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: A case study in Zhangjiakou

- Rehabilitation Headquarters. Technical Report (In Persian)
- Rijsberman M A, and Van de Ven F H (2000) Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems. *Environmental Impact Assessment Review* 20(3):333-345
- Shen L, Shu T, Liao X, Yang N, Ren Y, Zhu M, ... and Wang J (2020) A new method to evaluate urban resources environment carrying capacity from the load-and-carrier perspective. *Resources, Conservation and Recycling* 154:104616
- Tong S, Zhiming F, Yanzhao Y, Yumei L, and Yanjuan W (2018) Research on land resource carrying capacity: Progress and prospects. *Journal of Resources and Ecology* 9(4):331-340
- Wang C, Hou Y, and 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
- Wang S, Yang F L, Xu L, and Du J (2013) Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints. *Journal of Cleaner Production* 53:158-166
- Weihua Z, Huadong W, Jiyu X, Wenhui Y, Boren G, and Fengqiao M (1992) Environmental carrying capacity: A key to coordinating population, resources and environment. *Chinese Journal of Population Resources and Environment* 1(1):26-32
- Wu C, Zhou L, Jin J, Ning S, Zhang Z, and 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
- 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
- Wu Y, Feng Z, and Yang Y (2016) Spatial-temporal evolution pattern and future scenario analysis of water resources carrying capacity of Ningbo City. In: *International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*, Hong Kong, China, 3-12
- Xiao-qing Z, Hui R, Qi Y, Chun-lan H, and Hong-hui Y (2012) Scenarios simulation on carrying capacity of water resources in Kunming City. *Procedia Earth and Planetary Science* 5:107-112
- in Ningbo, China. *Journal of Environmental Management* 92(8):2047-2053
- Liu, T, Yang X, Geng L, and Sun B (2020) A three-stage hybrid model for space-time analysis of water resources carrying capacity: A case study of Jilin Province, China. *Water* 12(2):426
- 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(1):258-269
- Mansouri B, Ahmadzadeh H, MASSAH B A, Morid S, Delavar M, and Lotfi S (2015) Assessment of climate change impacts on water resources in Zarrinehrud Basin using SWAT model. *Journal of Water and Soil* 28(6):1191-1203 (In Persian)
- 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
- Ming L (2011) The prediction and analysis of water resource carrying capacity in Chongqing metropolitan, China. *Procedia Environmental Sciences* 10:2233-2239
- Mou S, Yan J, Sha J, Deng S, Gao Z, Ke W, and Li S (2020) A comprehensive evaluation model of regional water resource carrying capacity: Model development and a case study in baoding, China. *Water* 12(9):2637
- Muzhikov V, Vershinina E, Muzhikov R, and Nikitin K (2018) Structure of interchannel and five primary elements connections according to the test of akabane. *Earth* 525:721
- Niu F, Yang X, and Zhang X (2020) Application of an evaluation method of resource and environment carrying capacity in the adjustment of industrial structure in Tibet. *Journal of Geographical Sciences* 30(2):319-332
- 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
- Rahmasani C, Setiadi H, and Djaja K (2020) Analysis of land-carrying capacity and population capacity around Manado–Bitung Toll Road, North Sulawesi Province. *Springer, Singapore* 95-108
- Rajabi M, Saravani S, Noor Bakhsh A (2015) The need to revitalize Lake Urmia, the causes of drought and threats. *Socio-Cultural Committee of Urmia Lake*

- a support-pressure coupling mechanism. *Science of the Total Environment* 688:838-854
- Zhang J, Zhang C, Shi W, and Fu Y (2019b) Quantitative evaluation and optimized utilization of water resources-water environment carrying capacity based on nature-based solutions. *Journal of Hydrology* 568:96-107
- Zhang S, Xiang M, Yang J, Fan W, and Yi Y (2019c) Distributed hierarchical evaluation and carrying capacity models for water resources based on optimal water cycle theory. *Ecological Indicators* 101:432-443
- Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, and Song W B (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
- Zhou X Y, Zheng B, and Khu S T (2019) Validation of the hypothesis on carrying capacity limits using the water environment carrying capacity. *Science of the Total Environment* 665:774-784
- Zhu M, Shen L, Tam V W, Liu Z, Shu T, and Luo W (2020) A load-carrier perspective examination on the change of ecological environment carrying capacity during urbanization process in China. *Science of the Total Environment* 714:136843
- Xin S, Li W, Jin H, and Li Q (2020) Dynamic assessment of water resources carrying capacity in Heze using fuzzy sets methods. *MSandE* 790(1):012087
- Yang J F, Lei K, and Qiao F (2014a) Research on water ecological carrying capacity: Progress and puzzles. *Advanced Materials Research* 869:634-639
- Yang J F, Lei K, and Qiao F (2014b) An improved index system of regional water ecological carrying capacity evaluation: A case study of Tieling City, China. *Advanced Materials Research* 869:627-633
- Yang J F, Lei K, Khu S T, Qiao F, and Liu Q (2015a) Assessment of water ecological carrying capacity using an indicator-based method applied to Tieling City, China. *Water Science and Technology: Water Supply* 15(5):940-947
- Yang J, Lei K, Khu S, and Meng W (2015b) Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: A case study of Tieling City, China. *Water Resources Management* 29(3):885-899
- Yongyong Z H A N G, and Jun X I A (2007) Research on regional water resources carrying capacity theory and method. *Progress in Geography* 26(2):126-132
- Zhang F, Wang Y, Ma X, Wang Y, Yang G, and Zhu L (2019a) Evaluation of resources and environmental carrying capacity of 36 large cities in China based on