

Assessing the Sustainability of Surface and Groundwater Resources in the Zayandehrood Basin

M. Khoshoei*¹, and H. R. Safavi²

Abstract

In this study, the sustainability status of surface and groundwater resources in the Zayandehrood River Basin was evaluated using the Multivariate Water Resources Index (MWRI). This index integrates three key parameters—average precipitation, available surface water volume, and exploitable groundwater volume—calculated through the entropy weighting method. To provide a more detailed analysis of the sustainability, three functional components of system reliability, system reversibility, and system vulnerability were calculated for each sub-basin, from which the initial sustainability index was derived. The novelty of this research lies in the incorporation of the temporal trend of the water resources index, assessed using the Mann-Kendall test, into the base sustainability model, leading to the development of a modified sustainability index. Utilizing 20 years of data on precipitation, surface flow volume, and groundwater level fluctuations, a composite water resources sustainability index was formulated. The analysis included five sub-basins: Buein-Miandasht in upstream of the Zayandehrood dam and four sub-basins Lenjanat, Najafabad, Esfahan-Borkhar, and Kuhpayeh-Segzi downstream of the dam. Results indicated that only the Buein-Miandasht sub-basin, with a modified sustainability index of 0.31, is in an acceptable condition, while the other sub-basins demonstrated critically low values (less than 0.001), indicating unsustainable conditions. These findings are consistent with field observations and the significant reduction in water resources downstream of the Zayandehrood Dam, underscoring the urgent need for a revision in regional water resource management strategies. The application of the MWRI in this study provides an effective framework for the integrated assessment of water resource sustainability at the basin level.

Keywords: Sustainability, Water Resources, Surface Water, Groundwater, Zayandehrood River Basin.

Received: May 4, 2025

Accepted: September 9, 2025

ارزیابی پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود

مهرداد خشوعی^{۱*} و حمیدرضا صفوی^۲

چکیده

در این پژوهش، وضعیت پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از شاخص چندمتغیره منابع آب (MWRI) ارزیابی شده است. این شاخص از ترکیب سه پارامتر کلیدی شامل میانگین بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری، با بهره‌گیری از روش وزن‌دهی آنتروپی به‌دست آمده است. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر پایداری، سه مؤلفه عملکردی شامل قابلیت اعتماد، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری سیستم برای هر زیرحوضه محاسبه و شاخص اولیه پایداری استخراج شد. نوآوری پژوهش حاضر افزودن عامل روند زمانی شاخص منابع آب، با استفاده از آزمون من-کندال، به مدل پایه پایداری است که منجر به تعریف یک شاخص پایداری اصلاح‌شده شد. در این مطالعه با استفاده از داده‌های ۲۰ ساله بارش، حجم جریان سطحی و تغییرات سطح ایستابی، شاخص ترکیبی پایداری منابع آب توسعه داده شد. پنج زیرحوضه شامل بوئین‌میاندشت (بالادست سد) و چهار زیرحوضه پایین‌دست شامل لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی در این بررسی لحاظ شده‌اند. نتایج نشان داد که تنها زیرحوضه بوئین‌میاندشت با شاخص پایداری اصلاح‌شده ۰/۳۱ در وضعیت قابل قبول قرار دارد، در حالی که سایر زیرحوضه‌ها دارای مقادیر بسیار پایین (کمتر از ۰/۰۰۱) و در وضعیت ناپایدار هستند. این یافته‌ها با مشاهدات میدانی و کاهش محسوس منابع آبی در پایین‌دست سد زاینده‌رود انطباق دارند و بیانگر لزوم بازنگری در مدیریت منابع آب منطقه هستند. کاربرد شاخص MWRI در این تحقیق چارچوبی مؤثر برای ارزیابی یکپارچه پایداری منابع آبی در سطح حوضه فراهم می‌نماید.

کلمات کلیدی: پایداری، منابع آب، آب سطحی و آب زیرزمینی، حوضه آبریز زاینده‌رود.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۶/۱۸

1- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: m.khoshoei@kashanu.ac.ir

2- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: hasafavi@cc.iut.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.521148.2861](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.521148.2861)

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*- نویسنده مسئول

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

نیازهای انسانی ایفا می‌کنند. مطابق با اصول توسعه پایدار، استفاده از این سرمایه‌ها توسط نسل کنونی باید به‌گونه‌ای باشد که توانایی انتقال آن‌ها به نسل‌های آینده حفظ شده یا افزایش یابد. نگهداری سرمایه‌ها با نظریه‌های اقتصادی و بوم‌شناختی توسعه هماهنگ است و در مقیاس وسیع‌تر، این سرمایه‌ها باید با در نظر گرفتن جمعیت انسانی قابل انتقال باشند (Loucks, 2000). از طریق حفظ یا افزایش سرمایه‌ها، می‌توان ظرفیت بهره‌برداری پایدار و انتقال آن به نسل‌های آینده را تقویت نمود. دسترسی پایدار به منابع آب پاک، یکی از پایه‌های اساسی برای تضمین رفاه نسل‌های آینده است. چرخه آب در جهان و عواملی که بر جریان آب در سطح زمین و پوسته آن تأثیر می‌گذارند، امکان ذخیره‌سازی طبیعی آب را فراهم می‌کنند. با این حال، دسترسی به منابع آبی در طول زمان و مکان متغیر است: در بسیاری از مناطق، جمعیت انسانی فراتر از توان منابع آبی موجود است و این امر منجر به کاهش عملکرد اکوسیستم‌های آبی و خاکی می‌شود. در مقابل، گاهی در برخی مناطق آب به وفور یافت می‌شود، اما استفاده‌های متناقض، از جمله تأمین نیازهای انسانی و کاربردهای صنعتی، چالش‌هایی را برای مدیریت منابع آبی ایجاد کرده است (National Research Council, 1999).

مدیریت منابع آب از دیرباز تلاش کرده است تا استفاده از این منابع را به نفع بشر بهینه کند. زیرساخت‌های متعددی برای ذخیره آب، اطمینان از دسترسی به آب شرب، کنترل جریان رودخانه‌ها برای پیشگیری از سیلاب، حمایت از کشتیرانی و تولید انرژی برق‌آبی ساخته شده‌اند. انسان با بهره‌گیری از سرمایه‌های طبیعی و ترکیب آن‌ها با سرمایه‌های ساخته‌شده، توانسته است منابع آبی را برای مصارف مختلف گسترش دهد. با این حال، بسیاری از این تغییرات بزرگ در مدیریت منابع آبی، پیامدهای نامطلوب و پیش‌بینی‌ناپذیری در بلندمدت به همراه داشته‌اند. در برخی موارد، بهره‌برداری از منابع آبی در یک حوزه باعث کاهش یا تخریب در سایر حوزه‌ها شده است، به‌ویژه در زمینه سرمایه‌های طبیعی که نقش کلیدی در تأمین نیازهای بشر دارند؛ اما با خطر کاهش یا نابودی مواجه‌اند. به‌منظور بهبود مدیریت منابع آبی و کاهش پیامدهای منفی، توسعه و به‌کارگیری شاخص‌ها و معیارهایی مبتنی بر نظریه «نگهداری سرمایه» می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. این شاخص‌ها ابزارهای مفیدی برای سیستم‌های بازخوردی فراهم می‌آورند که در دسترس سیاست‌گذاران، مدیران و عموم مردم قرار می‌گیرند. چنین سیستمی می‌تواند نارسایی‌های موجود در ارائه گزارش‌ها و تحلیل‌های مرتبط با استفاده و دسترسی به منابع آبی را شناسایی و رفع کند. این شاخص‌ها نه تنها ضعف‌های موجود در بازخوردهای مربوط به جنبه‌های مختلف مدیریت منابع آبی را بهبود می‌بخشند، بلکه امکان ارزیابی جامع‌تر سیاست‌ها، اقدامات مدیریتی و تصمیم‌گیری‌های

در دهه‌های اخیر، توسعه پایدار به‌عنوان مفهومی بنیادین در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری منابع طبیعی، به‌ویژه در حوزه مدیریت منابع آب، جایگاه ویژه‌ای یافته است. بنا بر تعریف ارائه‌شده توسط کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه (WCED, 1987)، توسعه پایدار به معنای تأمین نیازهای نسل حاضر بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای پاسخگویی به نیازهای خود است. در این چارچوب، مدیریت منابع آب باید به گونه‌ای انجام شود که ابعاد محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی به‌صورت متوازن مدنظر قرار گیرند (Mays, 2006). از آنجا که سامانه‌های منابع آب تحت تأثیر عوامل متغیر اقلیمی و انسانی قرار دارند، به‌عنوان سیستم‌هایی پویا و تطبیق‌پذیر شناخته می‌شوند که نیازمند رویکردهای مدیریتی انعطاف‌پذیر و آینده‌نگر هستند (Folke, 2006). از این‌رو، طراحی شاخص‌ها و معیارهای کمی برای ارزیابی عملکرد این سیستم‌ها در طول زمان، گامی ضروری در جهت دستیابی به اهداف پایداری محسوب می‌شود. آب، به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین عناصر حیات و زیرساخت توسعه اقتصادی و اجتماعی، محور اصلی بسیاری از تلاش‌های جهانی برای تحقق توسعه پایدار قرار دارد (Loucks and van Beek, 2017).

چه اقدامات و بازخوردهایی می‌توانند به تقویت توسعه پایدار در زمینه‌های فناوری، سبک زندگی، سیاست‌گذاری و مدیریت منابع کمک کنند؟ برای دستیابی به توسعه پایدار، چه سطحی از تعامل و هم‌افزایی بین نظام‌های اقتصادی، جوامع انسانی و محیط‌زیست لازم است؟ پاسخ به این پرسش‌ها منجر به تلاش‌های گسترده‌ای برای طراحی ابزارهایی جهت تدوین شاخص‌های قابل ارزیابی شده است. در این راستا، برای انتخاب شاخص‌های مناسب، ضروری است مفاهیم کلی توسعه به پدیده‌ها و معیارهای قابل سنجش تبدیل شوند. یکی از روش‌های ارزیابی این شاخص‌ها، روش نگهداری سرمایه است. این رویکرد علاوه بر سرمایه انسانی که در سیستم‌های اقتصادی نقش دارد، به نوع دیگری از سرمایه‌ها نیز توجه می‌کند؛ از جمله سرمایه‌های طبیعی که ریشه در محیط‌زیست دارند و سرمایه‌های اجتماعی که از فرهنگ‌ها، نهادها و نظام‌های حکومتی نشأت می‌گیرند (Folke, 2006). ظرفیت محیط‌زیست برای جذب و مدیریت ضایعات و همچنین، توانایی زیست‌کره و زیرسیستم‌های آن برای سازگاری و تحول نیز جزئی از این سرمایه به شمار می‌روند. علاوه بر این، فعالیت‌های سازمان‌یافته‌ای که توسط نهادها، شبکه‌های ارتباطی و سنت‌های فرهنگی شکل می‌گیرند، در تعریف سرمایه گنجانده می‌شوند. هر سه نوع سرمایه - طبیعی، انسانی و اجتماعی - نقش مهمی در تأمین

مرتبط با سرمایه‌گذاری در این حوزه را فراهم می‌آورند. به این ترتیب، با بهره‌گیری از این معیارها، می‌توان تصمیم‌گیری‌ها را به صورت سیستماتیک و با رویکردی پایدارتر انجام داد (National Research Council, 1999).

در دهه‌های اخیر تعاریف متنوعی در زمینه پایداری منابع آب ارائه شده است. با افزایش پیچیدگی مسائل مرتبط با مدیریت منابع آبی، تحقیقات گسترده‌ای به منظور تلفیق مفهوم پایداری با مدیریت این منابع صورت گرفته است. هدف از اعمال اصول پایداری این است که منابع آبی موجود نه تنها برای استفاده نسل کنونی، بلکه برای نسل‌های آینده نیز حفظ شوند. (Loucks and Gladwell (1999) مفهوم پایداری منابع آب را به عنوان طراحی و مدیریت سیستم‌های آبی که به تمامی جنبه‌های اجتماعی، محیط‌زیستی و هیدرولوژیکی در حال و آینده توجه داشته باشد، تعریف کردند. (Mays (2006) پایداری منابع آب را به عنوان توانایی ارائه و مدیریت منابع آبی برای رفع نیازهای فعلی انسان و اکوسیستم، بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده، معرفی کرد. یکی دیگر از تعاریف پایداری منابع آب، تأمین آب کافی و باکیفیت برای نیازهای انسانی و محیط‌زیستی در مقیاس‌های مختلف، از زیرحوضه‌ها تا مقیاس جهانی و حفاظت از انسان در برابر بلایای طبیعی و انسانی مرتبط با آب است. این تعاریف از پایداری آب، تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان را ملزم می‌کند تا تمامی پیامدهای اقدامات مرتبط با منابع آبی را هم در حال حاضر و هم در آینده در نظر بگیرند. با توجه به افزایش پیچیدگی و عدم قطعیت در مسائل مربوط به آب، اتکا به معیارهای فنی به‌تنهایی کافی نیست. اضافه کردن معیارهای اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی به فرآیند تصمیم‌گیری، امکان بررسی بهتر این پیچیدگی‌ها را فراهم می‌کند (Loucks and Gladwell, 1999). بررسی این تعاریف نشان می‌دهد که مدیریت پایدار منابع آب تنها از طریق یکپارچه‌سازی مسائل مرتبط با آب و مشارکت تمامی ذی‌نفعان قابل اجرا است. (Mays (2006) به سه بعد اصلی مدیریت یکپارچه منابع آب اشاره کرد: اهداف، مقیاس و حکمرانی. اهداف به مسائل توسعه‌ای و اجتماعی نظیر توانمندسازی جنسیتی، کاهش فقر و تقویت عدالت اجتماعی اشاره دارند. مقیاس شامل سطوح محلی تا ملی، نظیر حوضه‌های آبریز است و حکمرانی به نقش نهادهای دولتی، بخش‌های اقتصادی و جامعه مدنی می‌پردازد. (Loucks and Gladwell (1999) نیز بر لزوم یکپارچه‌سازی مسائل مرتبط با آب تأکید کردند و بر این باور بودند که رویکرد جامع و یکپارچه به برنامه‌های آبی برای تحقق پایداری ضروری است.

همچنین، در دهه‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای برای سنجش پایداری سیستم‌های منابع آب صورت گرفته است. Loucks

(1997) شاخصی برای پایداری ارائه کرد که شامل سه مؤلفه اساسی قابلیت اطمینان، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری بود. این شاخص‌ها بر مبنای ارزیابی زمانی تعریف و محاسبه شدند. همچنین، (Loucks (1994 تأثیرات پایداری بر مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب را تحلیل نمود و به بررسی فرآیند کاهش پایداری در سیستم‌ها پرداخت و در سال ۲۰۰۰ اصول مدیریت پایدار منابع آب را معرفی کرد (Loucks, 2000). در ادامه، (Sandoval-Solis et al. (2011) با استفاده از روش حجمی، نسخه اصلاح‌شده‌ای از شاخص پایداری را طراحی کردند که بر قابلیت اطمینان، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری تأکید داشت. (Safavi et al. (2016) با بهره‌گیری از همین معیارها، شاخص پایداری فازی را توسعه دادند. این شاخص‌ها به طور گسترده در بررسی و حل مسائل مرتبط با مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی برای بررسی پایداری منابع آب و ارائه رویکردهای نوین در این زمینه انجام شده است. (Kundzewicz (1997 شاخص‌های مرتبط با منابع آب را برای تحقق توسعه پایدار معرفی کرد و تأکید نمود که دستیابی به این هدف مستلزم رویکردی یکپارچه است. این رویکرد باید شامل منابع آبی، اجزای هیدرولوژیکی و سیستم‌های محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و جمعیت‌شناسی است. (Sophocleous (2000) مفهوم پایداری آب را با محوریت هیدرولوژی مطرح کرد. (Raju et al. (2000) نیز در همان سال، در اسپانیا تحلیلی از تصمیم‌گیری چندمعیاره برای برنامه‌ریزی منابع آب پایدار ارائه دادند. این تحقیق عوامل اقتصادی نظیر هزینه‌های اولیه و نگهداری سیستم آبیاری، سودآوری محصولات و یارانه‌ها، عوامل محیط‌زیستی مانند کیفیت و حجم آب، و عوامل اجتماعی از جمله اشتغال‌زایی و مناطق بدون کشت را برای رتبه‌بندی گزینه‌ها بررسی نمود.

(Cai et al. (2002) چارچوبی برای تحلیل پایداری در مدیریت منابع آب در حوضه سیردریا ارائه کردند که بر کاهش خطر در تأمین آب، حفاظت محیط‌زیستی، تخصیص بهینه آب و توسعه اقتصادی تأکید داشت. (Fowler et al. (2003) اثرات تغییرات اقلیمی را بر شاخص‌هایی نظیر قابلیت اعتماد و برگشت‌پذیری سیستم‌های منابع آب بررسی کردند. (Richter et al. (2003) به مدیریت محیط-زیستی پایدار برای جریان رودخانه‌ها پرداختند و شش مرحله برای بازسازی اکوسیستم‌های رودخانه‌ای آسیب‌دیده پیشنهاد دادند. (Fogg and LaBolle (2006) به ترکیب مسائل اجتماعی با پایداری کیفیت آب‌های زیرزمینی پرداختند.

(Ajami et al. (2008) مدیریت منابع آب پایدار را بر اساس تحلیل عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی ارائه کردند و تأثیر این عدم قطعیت‌ها بر شاخص‌هایی نظیر اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری را

بررسی نمودند. (2010) Staben et al. شاخص‌هایی برای ارزیابی عملکرد ذخایر آب ارائه دادند و چارچوبی جامع برای گزارش‌دهی در مورد مسئولیت اجتماعی و محیط‌زیستی مرتبط با ذخایر آب طراحی کردند. (2013) Borghi et al. از یک مطالعه ارزیابی چرخه عمر برای تحلیل خدمات آب آشامیدنی در سیسیل ایتالیا بهره بردند. (2013) Cao et al. مدلی برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در دشت شمال چین ارائه کردند که بینشی برای مدیریت پایدار سایر آبخوان‌های آسیب‌دیده فراهم نمود. (2015) Collet et al. پایداری ذخایر آب و راهبردهای انطباق را با توجه به تغییرات اقلیمی و آلودگی در یک زیرحوضه مدیترانه‌ای بررسی کردند. (2015) Ashoori et al. نیز در همان سال تحلیل جامعی از پایداری ذخایر آب در منطقه لس‌آنجلس ارائه دادند که عوامل مختلفی مانند نمک‌زدایی، جمع‌آوری آب باران و بازسازی محیط‌زیستی را در بر می‌گرفت. (2015) Brown et al. آینده تحلیل سیستم‌های منابع آب را با تمرکز بر چارچوب علمی مدیریت پایدار آب بررسی کردند. (2016) Leite et al. با استفاده از ۲۵ شاخص پایداری، روش‌هایی برای ارزیابی اهداف پایداری ارائه دادند. (2016) Sampson et al. در همان سال مدلی برای تجزیه و تحلیل منابع آب و تقاضا ارائه کردند که در مدیریت بحران‌هایی مانند خشکسالی و تغییرات اقلیمی در منطقه Phoenix کاربرد داشت. (2017) Karamouz et al. با استفاده از شاخص‌هایی نظیر برگشت‌پذیری، قابلیت اعتماد و آسیب‌پذیری، پایداری منابع آب را بررسی کردند. (2017) MacEwan et al. نیز مدلی اقتصادی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در کالیفرنیا معرفی کردند که نقش مؤسسات مدیریتی را تحلیل می‌کرد. مفهوم توسعه پایدار و اهمیت آن در مدیریت منابع آب در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این رویکرد بر تعامل مؤثر میان جوامع انسانی، سیستم‌های اقتصادی و محیط‌زیست تأکید دارد و هدف آن حفظ منابع طبیعی، از جمله منابع آبی، برای نسل‌های آینده است. با توجه به چالش‌ها و پیچیدگی‌های موجود در مدیریت منابع آبی، استفاده از شاخص‌ها و معیارهای مناسب، از جمله روش نگهداری سرمایه، می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌ها کمک کند. این معیارها به ارزیابی عملکرد منابع آبی، شناسایی ضعف‌ها و تقویت اقدامات مدیریتی می‌پردازند. در این راستا، تعامل و هم‌افزایی میان ابعاد اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی برای دستیابی به پایداری منابع آب ضروری است. تلاش‌های گسترده‌ای برای طراحی و تدوین شاخص‌های پایداری صورت گرفته که به ارزیابی جامع‌تر منابع آب و تأثیرات آن بر اکوسیستم‌ها کمک می‌کند، از این‌رو، مدیریت پایدار منابع آب به یک اولویت جهانی تبدیل شده است.

(1997) Loucks برای نخستین بار شاخصی برای کمی‌سازی پایداری سیستم‌های منابع آب با استفاده از سه معیار قابلیت اعتماد، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری توسعه داد. او شاخص پایداری را برای ارزیابی کارایی گزینه‌های مختلف مدیریتی از دیدگاه کاربران آب و محیط‌زیست تعریف کرد. این شاخص، تخمینی از ظرفیت سیستم در کاهش آسیب‌پذیری آن است. اگر یک سیاست پیشنهادی باعث شود که سیستم پایدارتر شود، این شاخص نشان می‌دهد که سیستم ظرفیت بالایی برای کاهش آسیب‌پذیری در آینده دارد.

شاخص پایداری یکی از ابزارهای کلیدی برای ارزیابی وضعیت سیستم‌های منابع آب در مواجهه با چالش‌های مختلف است. این شاخص برای نخستین بار توسط (1982) Hashimoto et al. ارائه شد. این تعریف اولیه بر اساس معیار زمان بود و به نحوه عملکرد سیستم‌های منابع آب در طول زمان برای حفظ پایداری اشاره داشت. رویکرد زمان‌محور هاشیموتو بر اهمیت توانایی سیستم در پاسخگویی به تغییرات شرایط محیطی و مدیریت منابع آب به شکلی که نیازهای جاری و آتی را برآورده کند، تأکید داشت. (2011) Sandoval-Solis et al. این مفهوم را گسترش داده و آن را بر پایه معیار حجمی بازتعریف کردند. در این بازتعریف، شاخص پایداری به‌طور خاص به میزان آب موجود در سیستم و توانایی آن در تأمین تقاضا در طول دوره‌های مختلف زمانی توجه داشت. این دیدگاه حجمی، ابعاد فیزیکی و عملیاتی سیستم را با دقت بیشتری در نظر می‌گرفت و تأثیراتی مانند تغییرات در میزان بارندگی، تبخیر و مصرف آب را در تحلیل‌ها وارد می‌کرد. در ادامه، (2016) Safavi et al. این شاخص را بر اساس قوانین فازی تبیین کردند. استفاده از منطق فازی امکان تحلیل‌های انعطاف‌پذیرتر و دقیق‌تری را فراهم کرد، به‌ویژه در شرایطی که داده‌های کمیابی یا عدم قطعیت‌های محیطی وجود دارد. این روش، ترکیبی از معیارهای مختلف را در یک چارچوب جامع ادغام کرد و نشان داد که سیستم‌های منابع آب چگونه می‌توانند تحت تأثیر عوامل متنوع، از جمله تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضای آب، قرار گیرند. با توسعه این شاخص در طول زمان، از رویکردهای ساده‌تر به رویکردهای چندبعدی و پیچیده‌تر پیش رفته‌ایم. این تحولات نشان‌دهنده اهمیت روزافزون ارزیابی‌های دقیق‌تر و چندجانبه برای بهبود مدیریت منابع آب در جهان است. به همین دلیل، شاخص پایداری همچنان به‌عنوان یک ابزار مهم برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب باقی مانده است. شاخص‌های عملکرد در سیستم‌های منابع آب نقشی اساسی در ارزیابی و تعیین میزان پایداری این منابع دارند. این شاخص‌ها ابزارهایی کارآمد برای بررسی و تحلیل سیاست‌های مدیریتی

مختلف هستند و به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهند گزینه‌های متنوع مدیریت منابع آب را با یکدیگر مقایسه کنند. هدف اصلی این پژوهش توسعه و کاربرد شاخص پایداری اصلاح شده^۱ (MSI) برای ارزیابی وضعیت منابع آب حوضه زاینده‌رود است. در ادامه، به اهمیت استفاده از شاخص پایداری پرداخته می‌شود و معیارهای اصلی مانند قابلیت اطمینان، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرند. همچنین، تعریف شاخص پایداری بر مبنای شاخص یکپارچه منابع آب توضیح داده خواهد شد. علاوه بر این، این تحقیق به مراحل محاسبه شیب یا روند تغییرات سری زمانی شاخص یکپارچه منابع آب نیز می‌پردازد و روش‌های تحلیل دقیق‌تری برای ارزیابی پایداری ارائه می‌دهد.

نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه شاخص پایداری منابع آب است. در این تحقیق، شاخص چندمتغیره منابع آب^۲ (MWRI) با سه مؤلفه اصلی پایداری شامل قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری ترکیب شده و سپس با افزودن روند زمانی شاخص بر اساس آزمون من-کندال^۳ به شاخص پایداری اصلاح‌شده تبدیل شده است. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر تغییرات پایداری منابع آب را در طول زمان فراهم می‌سازد و نسبت به مطالعات پیشین جامع‌تر و کاربردی‌تر است.

۲- روش تحقیق

به‌منظور درک بهتر مراحل انجام تحقیق و فرآیند محاسبه شاخص پایداری منابع آب، در این بخش فلوچارتی ارائه شده است که روند کلی پژوهش را به‌صورت گام‌به‌گام نمایش می‌دهد. این فلوچارت شامل مراحل اصلی از جمع‌آوری داده‌ها، محاسبه شاخص چندمتغیره منابع آب، تحلیل روند زمانی، ارزیابی معیارهای عملکرد سیستم و در نهایت محاسبه شاخص پایداری اصلاح‌شده است. هدف از این نمودار، ارائه تصویری شفاف از ساختار منطقی تحقیق برای سهولت در تبیین و پیاده‌سازی روش پیشنهادی است. شکل ۱ روند محاسبه شاخص چند متغیره منابع آب نشان داده شده است. در این تحقیق از سه پارامتر ورودی بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس استفاده شده است. انتخاب این سه پارامتر بر پایه مطالعات پایداری منابع آب و در نظر گرفتن ماهیت تلفیقی منابع آب در حوضه زاینده‌رود صورت گرفته است. این پارامترها نمایانگر ورودی، وضعیت سطحی و زیرزمینی منابع آب هستند.

در این تحقیق ابتدا شاخص چند متغیره منابع آب بر اساس روابط وزن‌دهی آنتروپی محاسبه خواهد شد. این شاخص دارای پارامترهای ورودی بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم

آب زیرزمینی در دسترس است. هرکدام از پارامترهای ورودی دارای وزن به‌خصوص است. شاخص چند متغیره منابع آب بر اساس رابطه زیر بدست خواهد آمد (Khoshoei and Safavi, 2023):

$$MWRI = W_1 \times P + W_2 \times ASW + W_3 \times AGW \quad (1)$$

که در این رابطه MWRI نشان‌دهنده شاخص چندمتغیره منابع آب، P مقدار بارندگی^۴، ASW بیانگر حجم آب سطحی در دسترس^۵ و AGW معرف حجم آب زیرزمینی در دسترس^۶ است. همچنین، W₁، W₂ و W₃ وزن آنتروپی اختصاص یافته به معرف‌های بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس است (Khoshoei and Safavi, 2023). کلیه پارامترهای بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس به‌صورت مقادیر نرمال شده در رابطه (۱) استفاده خواهد شد. شاخص چند متغیره منابع آب بر اساس داده‌های موجود و روش آنتروپی در بازه ۰ و ۱ قرار دارد.

برای ارزیابی و محاسبه شاخص پایداری یک سیستم، ابتدا لازم است معیارهایی برای تعیین سطح رضایت‌بخشی یا نیاز سیستم تعریف و محاسبه شوند. این معیارها به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل وضعیت پایداری عمل می‌کنند. یکی از ابزارهای پرکاربرد در این فرآیند، استفاده از شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور مانند شاخص پوشش گیاهی با اختلاف نرمال‌شده^۷ (NDVI) است (Rouse et al., 1974). این شاخص می‌تواند به‌طور مستقیم برای تعیین نیاز در شاخص پایداری منابع آب مورد استفاده قرار گیرد، زیرا نمایانگر وضعیت پوشش گیاهی و در نتیجه، شرایط آبی منطقه است. حالت ناپایدار سیستم منابع آب در این روش، با توجه به ویژگی‌های خاص حوضه مورد مطالعه، به‌عنوان درصدی از سری زمانی داده‌های NDVI تعریف می‌شود. به عبارتی، اگر درصدی از داده‌های NDVI کمتر از آستانه تعیین شده باشد، سیستم در شرایط ناپایدار قرار دارد. نیاز یا سطح رضایت‌بخش سیستم نشان‌دهنده حداقل شرایط موردنیاز برای تأمین تقاضای آب بحرانی در حوضه آبریز است. این نیاز نه‌تنها بازتابی از وضعیت خشکسالی و کمبود آب است، بلکه معیاری برای شناسایی نقاط ضعف سیستم منابع آب در پاسخ به فشارهای محیطی و تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌رود. حالت سیستم منابع آب به شکل زیر تعریف و مورد تحلیل قرار می‌گیرد (Khoshoei and Safavi, 2023):

نیاز سیستم: این مقدار بیانگر سطح مطلوبی است که سیستم برای حفظ عملکرد پایدار خود به آن نیاز دارد و می‌تواند به صورت یک آستانه عددی یا محدوده‌ای از مقادیر NDVI تعریف شود.

وضعیت سیستم: وضعیت سیستم بر اساس داده‌های NDVI و مقایسه آن با نیاز یا حد رضایت‌بخش ارزیابی می‌شود. در صورتی که مقادیر NDVI در بخش عمده‌ای از سری زمانی کمتر از نیاز باشد، سیستم در شرایط ناپایدار قرار دارد (Safavi et al., 2016).

$$\text{Requirement} = \text{mean}(\text{MWRI}) \quad (2)$$

$$[\text{NDVI} \leq X\% \text{NDVI}]$$

$$X\% \text{NDVI} = \frac{X \times (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})}{100} + \text{NDVI}_{\min} \quad (3)$$

$$\text{MWRI} = \begin{cases} \text{unsatisfactory} & \text{MWRI} < \text{Requirement} \\ \text{satisfactory} & \text{Requirement} < \text{MWRI} \end{cases} \quad (4)$$

به بیان دیگر، برای تعیین حد رضایت‌بخش شاخص منابع آب، از میانگین حسابی مقادیر شاخص خشکسالی در دوره زمانی مشخص استفاده می‌شود. این مقدار زمانی معتبر است که مقدار شاخص NDVI مربوطه از X درصد اختلاف بین بالاترین و پایین‌ترین مقادیر شاخص NDVI در همان دوره زمانی کمتر باشد؛ به عبارت دیگر، این شاخص میزان تقاضای آبی را که در شرایط خشکسالی و کمبود منابع آبی ایجاد می‌شود، بر اساس مقایسه تغییرات پوشش گیاهی طی بازه زمانی مورد نظر اندازه‌گیری می‌کند. بدین ترتیب، سیستم منابع آب فقط در صورتی که میزان NDVI کاهش چشمگیری داشته باشد، وارد وضعیت ناپایدار و بحرانی خواهد شد. قابلیت اعتماد به این معناست که احتمالاً منابع تخصیص داده شده به مصرف‌کننده قادر به برآورده کردن نیازهای وی خواهند بود یا سیستم چقدر می‌تواند به صورت پایدار و بدون شکست عمل کند. این مفهوم به وضعیت سیستم اشاره دارد که در آن نیازها به‌طور مؤثر تأمین می‌شوند و به عبارتی دیگر، حالت موفقیت در سیستم معادل قابلیت اعتماد آن است. این ویژگی طبق رابطه زیر تعریف خواهد شد (Klemes et al., 1981; Hashimoto et al., 1982):

$$\text{Reliability} = \frac{\# \text{MWRI} < \text{Requirement}}{n} \quad (5)$$

برگشت‌پذیری به توانایی سیستم در سازگاری با تغییرات شرایط اشاره دارد. در سیستم‌های منابع آب، این مفهوم به احتمال بازگشت سیستم به وضعیت بهینه پس از وقوع شکست اطلاق می‌شود. از آنجا که شرایط آب و هوایی و وضعیت منابع آب معمولاً ثابت نیست، برگشت‌پذیری به‌عنوان یک معیار آماری برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم نسبت به تغییرات محیطی و سیاست‌های

مدیریتی مختلف به کار می‌رود (IPCC, 2007; WHO, 2009). برگشت‌پذیری معیاری است که احتمال بازگشت سیستم به حالت بهینه پس از شکست را اندازه‌گیری می‌کند (Hashimoto et al., 1982). همچنین، Moy et al. (1986) با تعریف حداکثر تعداد دوره‌های متوالی که یک سیستم قبل از بازگشت به وضعیت مطلوب با کمبود مواجه است، مفهوم برگشت‌پذیری یا انعطاف‌پذیری سیستم‌های منابع آب را مشخص کردند. در حال حاضر، رایج‌ترین تعریف برگشت‌پذیری، به‌طور احتمالاتی، به شمارش تعداد دفعاتی که سیستم در طول شبیه‌سازی از وضعیت شکست به حالت مطلوب بازگشته، نسبت به تعداد کل دفعاتی که با کمبود مواجه شده است، پرداخته می‌شود (Ashofteh et al., 2014). این مفهوم از برگشت‌پذیری به کمک روابط زیر قابل تعریف است:

$$\text{RES} = \frac{\# \text{MWRI} > \text{Requirement after MWRI} < \text{Requirement}}{\# \text{MWRI} < \text{Requirement}} \quad (6)$$

آسیب‌پذیری به‌طور کلی مشابه با کمبودها در سیستم‌ها عمل می‌کند و زمانی که رخ می‌دهد، مشخص‌کننده شدت اختلالات در سیستم است (McMahon et al., 2006). این پارامتر می‌تواند به چندین روش تعریف شود: ۱) میانگین تعداد شکست‌ها (Loucks and van Beek, 2005)، ۲) میانگین بیشترین مقدار کمبودها در طول یک دوره متوالی از شکست‌های سیستم (Hashimoto et al., 1982)، یا ۳) احتمال افزایش کمبود در یک یا چند دوره از مقدار مشخصی (Mendoza et al., 1997). طبق جدیدترین روابط، معیار آسیب‌پذیری به‌عنوان نسبت مجموع کمبودها به تعداد گام‌هایی که در آن‌ها کمبود مشاهده شده، تقسیم بر مجموع نیازهای کاربر تعریف می‌شود. این نیاز می‌تواند به‌صورت سالانه یا بر اساس یک دوره زمانی خاص که نیازها در آن سنجیده می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد.

$$\text{VUL} = \frac{\sum (\text{Requirement} - \text{MWRI}) / \# (\text{MWRI} < \text{Requirement})}{\text{Requirement}} \quad (7)$$

علاوه بر سه عامل اساسی یعنی قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، روند تغییرات نیز نقش مهمی در تعیین پایداری یا ناپایداری یک سیستم ایفا می‌کند. در سیستم‌های منابع آب، مقدار بالای قابلیت اطمینان و برگشت‌پذیری همراه با سطح پایین آسیب‌پذیری نشان‌دهنده پایداری بیشتر است. در مقابل، اگر روند داده‌های سری زمانی به‌صورت کاهشی باشد، سیستم در وضعیت ناپایدار قرار می‌گیرد. در این پژوهش، با در نظر گرفتن پارامتر

سپس آزمون آماری استاندارد (Z) و P-Value مربوطه از رابطه ۱۳ بدست خواهد آمد:

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{for } s > 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{for } s < 0 \\ 0 & \text{for } s = 0 \end{cases} \quad (13)$$

که در این رابطه $P(Z)$ بر مبنای توزیع احتمالاتی نرمال محاسبه خواهد شد. سپس با محاسبه احتمال نرمال پارامتر Z_S شیب یا روند سری زمانی شاخص چندمتغیره منابع آب بدست خواهد آمد که پارامتر چهارم در محاسبه شاخص پایداری بر اساس شاخص چندمتغیره منابع آب در منطقه مورد مطالعه است.

شاخص پایداری، جمع‌بندی معیارهای عملکرد سیستم در یک شاخص کلی جهت تسهیل در مقایسه و تصمیم‌گیری بین گزینه‌های متفاوت مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب است (Lane et al., 2014). (Sandoval-Solis et al., 2011). شاخص پایداری را بر اساس سه معیار قابلیت اعتماد، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری به صورت زیر بیان کردند:

$$SI = [REL \times RES \times (1 - VUL)]^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

در این تحقیق پارامتر دیگری تحت عنوان روند سری زمانی به سه معیار قابلیت اعتماد، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری اضافه خواهد شد. این معیار توسط نتایج آزمون من-کندال برای محاسبه روند شاخص چند متغیره منابع آب بدست می‌آید. شاخص پایداری اصلاح شده به صورت زیر بیان می‌شود:

$$MSI = p(z) \times [REL \times RES \times (1 - VUL)]^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

که در معادله (۱۵) مقدار P-Value مشتق شده با استفاده از آزمون من-ویتنی^۱ یک باله را برای شاخص چند متغیره منابع آب را نشان می‌دهد. مقدار احتمال نرمال Z_S به عنوان پارامتر شیب در این تحقیق معرفی خواهد شد، عددی بین صفر و یک است.

روند، بر اساس آزمون من-کندال اصلاح می‌شود (Mann, Kulkarni and von Storch (1945; Kendall, 1975). (1945; Kendall, 1975). همچنین، Von Storch (1995) از روش پیش سفیدسازی برای بررسی سری‌های زمانی و ارزیابی تأثیر خودهمبستگی در آزمون من-کندال استفاده کردند. علاوه بر این، از مدل خودهمبسته مرتبه اول با در نظر گرفتن تأخیر مرتبه اول برای تعیین شیب سری زمانی شاخص یکپارچه خشکسالی استفاده خواهد شد (Yue et al., 2003). مراحل محاسبه این معیار به صورت زیر ارائه می‌شود (Ishak et al., 2013).

$$X_i = MWRI_j - \rho MWRI_{j-1} \quad i = 1, 2, \dots, j-1 \quad (8)$$

در این معادله، $MWRI_j$ نشان‌دهنده شاخص چندمتغیره منابع آب در دوره زمانی ز است که با استفاده از معادله (۸) تعریف شده است. معادله (۸) بیانگر مدل خودهمبسته مرتبه اول برای شاخص خشکسالی است. آماره آزمون من-کندال به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_j - X_i) \quad (9)$$

در این رابطه n تعداد مؤلفه‌های شاخص چند متغیره منابع آب است. X بیانگر سری زمانی پیش سفید شاخص چند متغیره منابع آب و همچنین، n تعداد داده‌های سری زمانی و sign به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Mann (1945) و Kendall (1975) میانگین و واریانس پارامتر S را برای $n \geq 8$ به ترتیب زیر تعریف نمودند:

$$E(S) = 0 \quad (11)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} = \sigma^2 \quad (12)$$

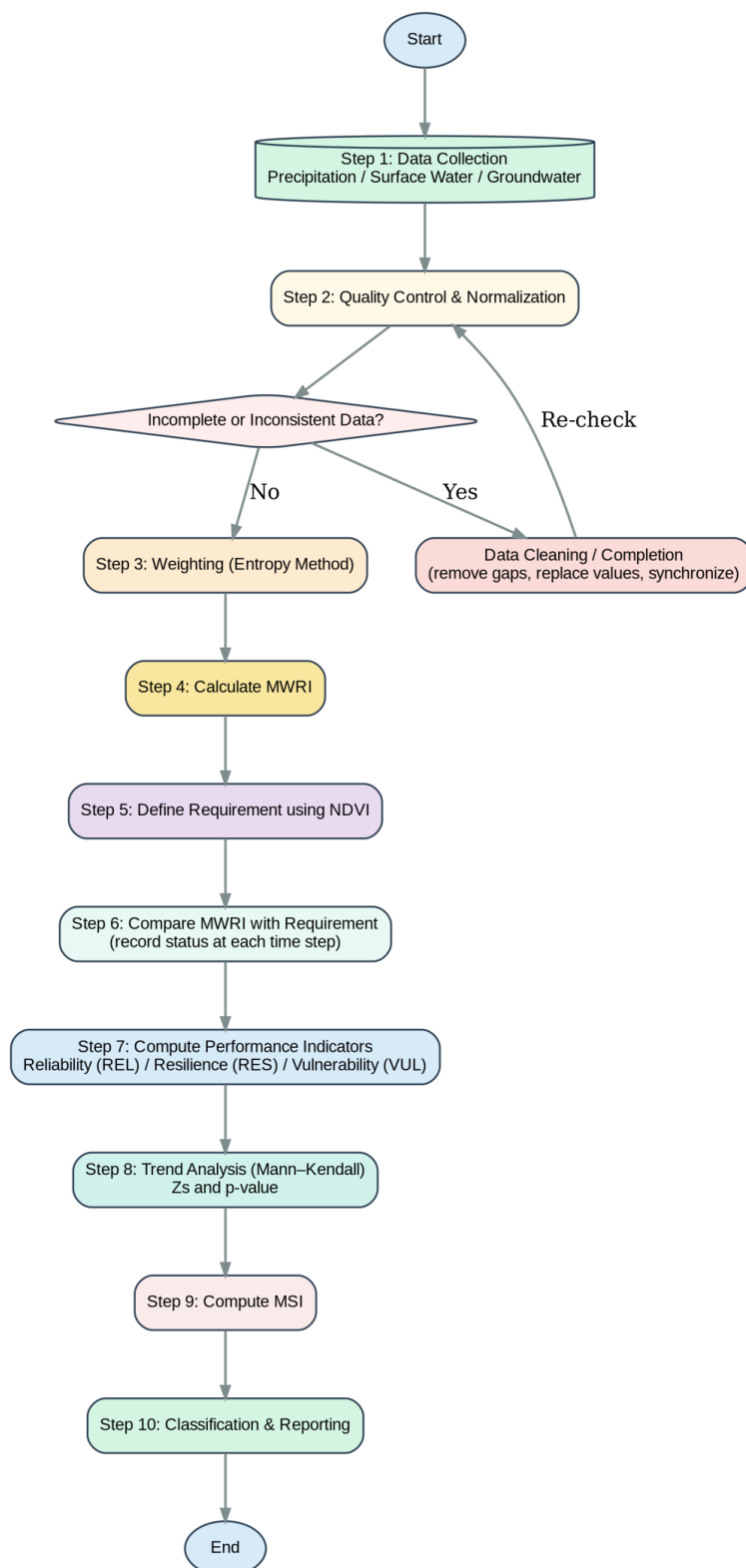


Fig. 1- Flowchart of the study methodology including MWRI calculation, performance evaluation, trend analysis and MSI computation

شکل ۱- فلوجارت روش‌شناسی مطالعه شامل محاسبه MWRI، ارزیابی عملکرد، تحلیل روند و محاسبه MSI

۳- مطالعه موردی

حوضه آبریز زاینده‌رود یکی از مهم‌ترین مناطق جمعیتی کشور به شمار می‌رود که به دلیل توسعه صنعتی و افزایش جمعیت، خصوصاً به واسطه مهاجرت از سایر استان‌ها، با بحران کم‌آبی مواجه شده است. رشد تقاضای آب موجب تشدید نابرابری بین عرضه و مصرف شده است. در گذشته، انتقال آب میان حوضه‌ای به‌عنوان راهکاری برای جبران این کمبود اجرا شده، اما گسترش تقاضا، به‌ویژه در نواحی کویری خارج از محدوده حوضه، شکاف عرضه و تقاضا را بیشتر کرده و لزوم بررسی دقیق این مسئله را دوچندان نموده است. حوضه زاینده‌رود با مساحت ۲۶,۹۱۷ کیلومترمربع

بخش قابل توجهی از حوضه آبریز تالاب گاوخونی را شامل می‌شود که خود بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران است. این حوضه از شمال به حوضه دریاچه نمک، از غرب و جنوب غرب به حوضه‌های آبریز کارون و دز، از شرق به دق سرخ و کویر سیاه‌کوه و از جنوب به حوضه شهرضا محدود می‌شود. بلندترین نقطه آن کوه کربوش با ارتفاع ۳,۹۷۴ متر از سطح دریا و پایین‌ترین نقطه آن نزدیکی تالاب گاوخونی با ارتفاع ۱,۴۵۰ متر است. در شکل ۲ موقعیت و تلاقی حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود را با حوضه آبریز گاوخونی و مرزهای سیاسی استان اصفهان نمایش داده شده است.

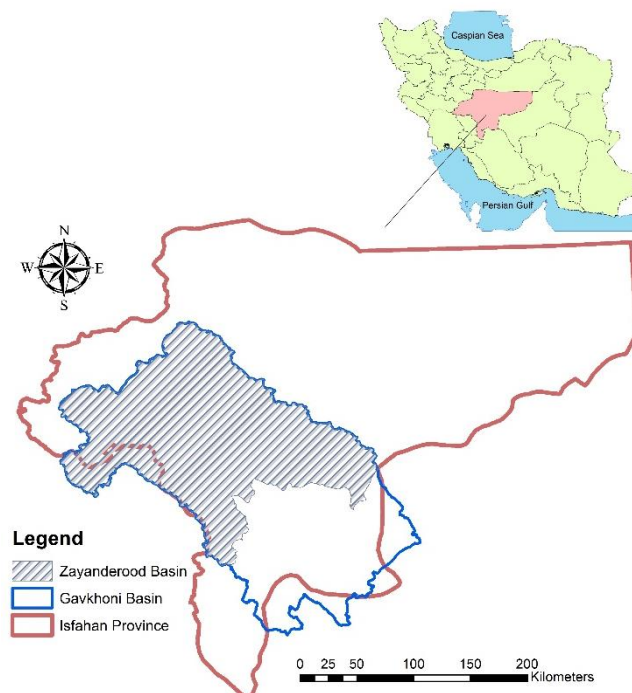


Fig. 2- The intersection of the Zayandehrood basin with the Gavkhouni basin and the political boundaries of Isfahan Province

شکل ۲- محل تلاقی حوضه آبریز زاینده‌رود با حوضه آبریز گاوخونی و مرزهای سیاسی استان اصفهان

دارد. آب این سد که در چادگان ذخیره می‌شود، با استفاده از رواناب‌های حاصل از بارندگی‌های فصول بهار و زمستان، به‌صورت جریانی کنترل شده به رودخانه آزاد می‌شود. مناطق بالادست این حوضه عمدتاً شامل ارتفاعات کوهستانی هستند که مصرف آب در آن‌ها پایین بوده و مساحتی در حدود ۴۰۰۰ کیلومتر مربع از کل حوضه را در بر می‌گیرند. در مقابل، نواحی مرکزی و پایین‌دست دره زاینده‌رود بیشتر از مناطق خشک و نیمه‌خشک، و تا حدی کوهستانی تشکیل شده‌اند که غالب چشم‌انداز آن‌ها شامل دشت‌های رسوبی با شیب ملایم و بستری خشک است. در این تحقیق از ۵ زیرحوضه در حوضه آبریز

پرآب‌ترین رود این حوضه، زاینده‌رود است که از دامنه‌های شرقی رشته‌کوه‌های زاگرس میانی سرچشمه می‌گیرد و با طولی حدود ۳۵۰ کیلومتر، در امتداد غرب به شرق جریان یافته و به تالاب گاوخونی می‌ریزد. این رودخانه نقشی اساسی در تأمین آب برای کشاورزی، مصارف شهری، صنعتی و سایر فعالیت‌های اقتصادی منطقه دارد. در مسیر آن، پس از سد مخزنی، تعدادی سرریز و بندهای انحرافی ساخته شده که امکان برداشت آب در نقاط مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی را فراهم می‌کند. سد مخزنی زاینده‌رود که از سال ۱۳۵۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفته، به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب، ظرفیتی معادل ۱۴۵۰ میلیون مترمکعب

شده است. زیرحوضه بوئین میانداشت در بالادست سد زاینده‌رود و زیرحوضه‌های لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی در پائین دست سد زاینده‌رود واقع است.

زاینده‌رود مورد مطالعه قرار گرفت. این ۵ زیرحوضه شامل بوئین میانداشت، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی است که در شکل ۳ موقعیت این زیرحوضه‌ها نشان داده

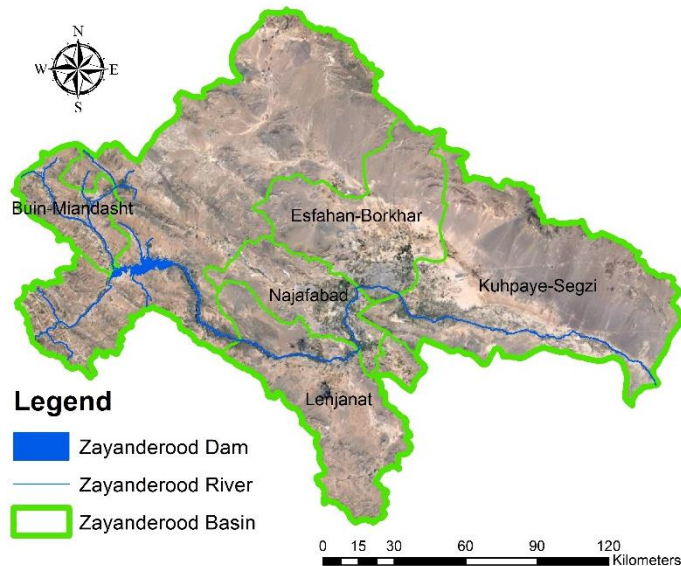


Fig. 3- Location of Zayandehrood river basin, Zayandehrood dam, Buin-Miandasht sub-basin (upstream) and Lenjanat, Najafabad, Esfahan-Borkhar and Kuhpaye-Segzi sub-basins (downstream)

شکل ۳- موقعیت حوضه زاینده‌رود، سد زاینده‌رود، زیرحوضه بوئین میانداشت (بالادست) و لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان- برخوار و کوهپایه سگزی (پایین دست)

برای زیرحوضه‌های بوئین میانداشت، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان- برخوار و کوهپایه-سگزی محاسبه شد. برای برآورد حجم آب سطحی قابل دسترس، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری متعلق به شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در محدوده زیرحوضه‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا، ایستگاه هیدرومتری اسکندری، به دلیل دارا بودن داده‌های بلندمدت دبی رودخانه زاینده‌رود در ناحیه بالادست سد زاینده‌رود، به‌عنوان نماینده زیرحوضه بوئین میانداشت انتخاب شد. همچنین، ایستگاه‌های پل کله، لنج، پل خواجه و پل چوم به ترتیب جهت برآورد حجم جریان سطحی در زیرحوضه‌های بوئین میانداشت، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان- برخوار و کوهپایه-سگزی به‌کار گرفته شدند. محاسبه حجم آب زیرزمینی در دسترس نیز بر پایه تفاوت میان سطح پیزومتريک (ارتفاع سطح ایستابی از سطح طبیعی زمین) و عمق سنگ بستر صورت گرفت. اطلاعات مربوط به سطح ایستابی از طریق اندازه‌گیری‌های ماهانه چاه‌های مشاهده‌ای توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان به‌دست آمده است. در مواردی که داده‌های پیزومتريک طی برخی ماه‌های سال‌های آبی مورد مطالعه در دسترس نبوده‌اند، از مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز زاینده‌رود به‌عنوان جایگزین استفاده شده است. با بهره‌گیری از روش درون‌یابی در

۴- نتایج

همان‌طور که بیان شد، شاخص چند متغیره منابع آب بر اساس داده‌های ورودی شامل بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس محاسبه خواهد شد. متغیرها یا پارامترهای ورودی شاخص چند متغیره منابع آب به دو دسته متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی تقسیم شده است. در برآورد شاخص چند متغیره منابع آب، از بارندگی به‌عنوان معرف هواشناسی و از حجم آب سطحی در دسترس و همچنین، حجم آب زیرزمینی در دسترس به‌عنوان معرف‌های هیدرولوژیکی استفاده خواهد شد. ابتدا به‌منظور محاسبه سری زمانی شاخص چند متغیره منابع آب، باید وزن‌های مربوط به هر کدام از متغیرها را بر اساس تئوری آنتروپی بدست آورد. همان‌طور که در شکل (۲) بیان شد، از ۵ زیرحوضه در حوضه آبریز زاینده‌رود در این تحقیق استفاده خواهد شد که یک زیرحوضه در بالادست سد و ۴ زیرحوضه در پایین دست سد زاینده‌رود قرار دارد. میزان بارندگی ماهیانه در پنج زیرحوضه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی وابسته به اداره کل هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای اصفهان استخراج شد. سپس، با بهره‌گیری از نرم‌افزار Arc GIS و به‌کارگیری روش‌های درون‌یابی مکانی، میانگین بارندگی ماهانه

محیط GIS، میانگین سطح ایستابی در هر یک از پنج زیرحوضه مذکور برآورد شد. همچنین، عمق متوسط سنگ بستر نیز در همین چارچوب مکانی محاسبه شد. نهایتاً، حجم ماهانه آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری با استفاده از اختلاف ارتفاع میانگین سطح پیرومتریک و میانگین عمق سنگ بستر، ضرب در مساحت آبخوان مربوطه در هر زیرحوضه، محاسبه شد.

نخستین گام در محاسبه شاخص چند متغیره منابع آب، تعیین ضرایب وزنی مؤلفه‌های ورودی این شاخص است. این ضرایب وزنی با استفاده از روابط ارائه شده توسط Khoshoei and Safavi (2023) استخراج می‌شوند. به‌طور مشخص، وزن دهی بر اساس سه روش مختلف صورت می‌گیرد: وزن آنتروپی، وزن مقیاسی و وزن آنتروپی اصلاح‌شده. شاخص چند متغیره منابع آب برای پنج زیرحوضه شامل بوئین‌میاندشت (واقع در بالادست سد زاینده‌رود)، لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان - برخوار و کوهپایه - سگزی (واقع در پایین‌دست سد زاینده‌رود) مطابق رابطه (۱) محاسبه خواهد شد.

جدول (۱) مقدار عددی وزن آنتروپی^۹ (W_i) بر اساس شاخص چند متغیره منابع آب بر پایه بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس^{۱۰} (P-ASW-AGW) در زیرحوضه‌های بوئین‌میاندشت، لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی ارائه می‌شود. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود مجموع ضرایب وزن آنتروپی در همه زیرحوضه‌ها برابر با ۱ است. به‌منظور بررسی تأثیر وزن‌های حاصل از روش آنتروپی بر نتایج نهایی شاخص MWRI، تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، وزن‌های محاسبه‌شده به‌طور سیستماتیک $\pm 10\%$ ، $\pm 20\%$ تغییر داده شدند و اثر آن بر مقدار نهایی MWRI و شاخص MSI مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در محدوده تغییرات معقول، نوسانات MWRI در حد قابل قبول باقی می‌ماند که بیانگر پایداری نسبی مدل نسبت به تغییر وزن‌هاست.

Table 1- Value of the weights for all sub-basins

جدول ۱- ضرایب وزنی پارامترها برای همه زیرحوضه‌ها

Weight	P	ASW	AQW	SUM
Buin-Miandasht	0.52	0.18	0.3	1
Lenjanat	0.21	0.63	0.16	1
Najafabad	0.2	0.67	0.13	1
Esfahan-Borkhar	0.3	0.55	0.15	1
Kuhpaye-Segzi	0.31	0.46	0.23	1

سه معیار اصلی یعنی قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری تعریف می‌شود. در پژوهش حاضر، این سه مؤلفه با بهره‌گیری از شاخص‌های چندمتغیره منابع آب ارزیابی خواهند شد. پیش‌تر، سری زمانی شاخص‌های چندمتغیره مرتبط با منابع آب در زیرحوضه‌های بوئین‌میاندشت (a) (بالادست سد زاینده‌رود)، (b) لنجانان، (c) نجف‌آباد، (d) اصفهان برخوار و (e) کوهپایه سگزی مورد معرفی قرار گرفت. نخستین مرحله در تعیین شاخص پایداری منابع آب، برآورد میزان نیاز یا سطح مطلوب شاخص چندمتغیره خشکسالی است. طبق توضیحات ارائه‌شده در فصل مربوط به مواد و روش‌ها، بخشی از سری زمانی شاخص NDVI که معادل A درصد از آن است، برای این هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از محاسبه ضرایب وزنی مربوط به پارامترهای بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس، سری زمانی شاخص چند متغیره منابع آب محاسبه خواهد شد. سری زمانی ۱۲ ماهه شاخص چند متغیره منابع آب مربوط به بارندگی، آب سطحی در دسترس و آب زیرزمینی در دسترس (W-AGW) از سال آبی ۱۳۷۳ تا سال آبی ۱۴۰۲ در شکل ۴ نمایش داده شده است.

شاخص پایداری، وضعیت ایستایی منابع آب یک حوضه را با تکیه بر داده‌های گذشته و شرایط کنونی منابع آبی آن تبیین می‌کند. بر پایه بررسی‌هایی که در بخش پیشینه تحقیق مطرح شد، این شاخص در مدیریت منابع آب و شبکه‌های شهری، با در نظر گرفتن

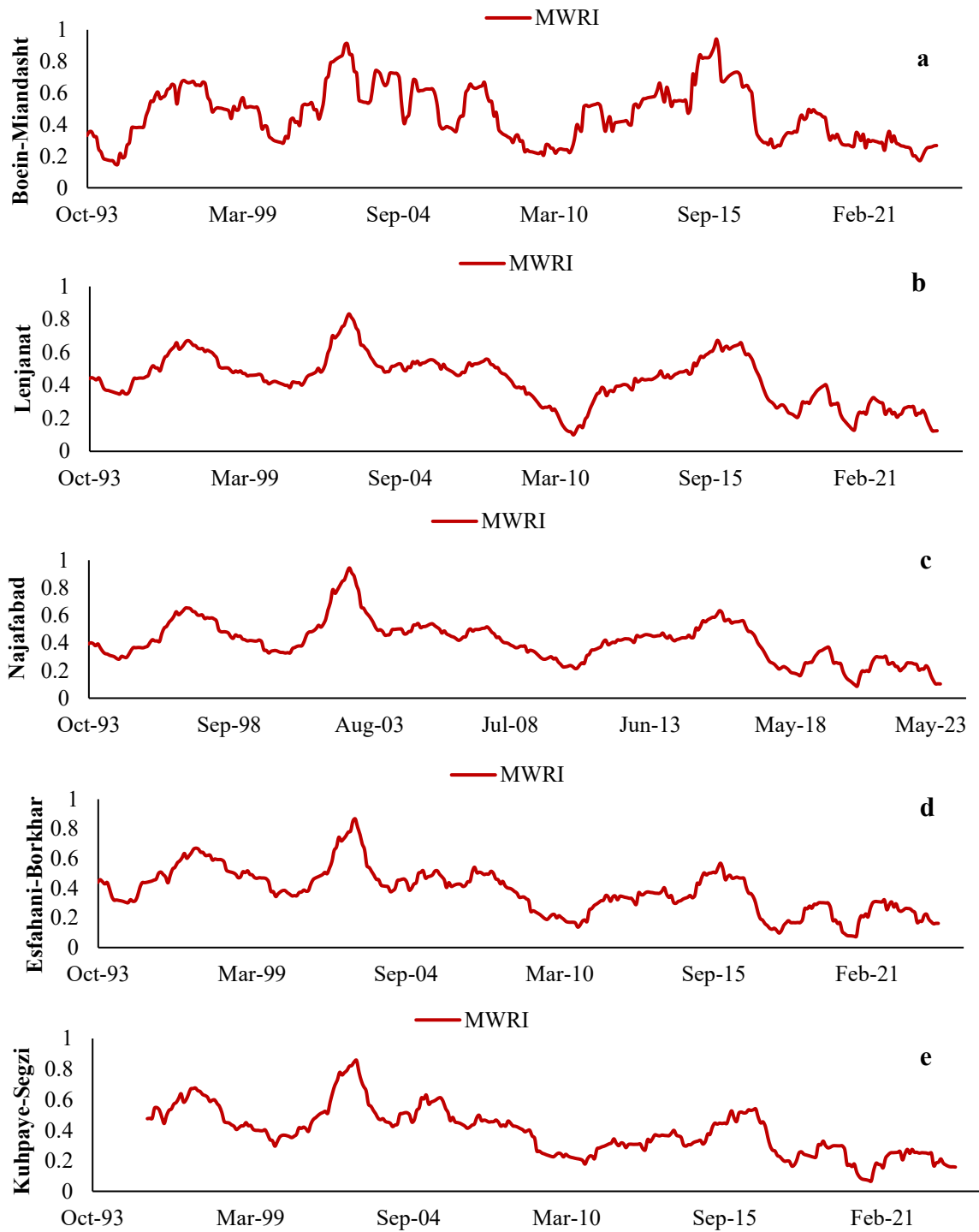


Fig. 4- Multivariate Water Resources Index time series based on precipitation, surface water and groundwater (P-ASW-AGW) for (a) Buin-Miandasht, (b) Lenjanat, (c) Najafabad, (d) Esfahan-Borkhar and (e) Kuhpaye-Segzi sub-basins in the Zayandehrood river basin

شکل ۴- سری زمانی شاخص منابع آب چند متغیره بر اساس بارش، آب‌های سطحی و زیرزمینی (P-ASW-AGW) برای (الف) زیرحوضه‌های بوئین میاندشت، (ب) لنجانات، (ج) نجف آباد، (د) اصفهان-برخوار و (ه) کوهپایه-سگزی در حوضه آبریز زاینده‌رود

وضعیت سیستم به‌عنوان شکست تلقی می‌شود و در مقابل، اگر شاخص از آن فراتر رود، نشانگر عملکرد موفق سیستم خواهد بود. در جدول (۲)، میزان نیاز تعریف شده برای شاخص‌های چندمتغیره منابع آب در زیرحوضه‌های یادشده و بر اساس شاخص P-ASW-AGW ارائه شده است.

در این تحقیق، مقدار این درصد برابر با ۲۵٪ در نظر گرفته شده است؛ رقمی که بر اساس حداقل نیاز زیستی گیاهان، درختان و پوشش گیاهی در حوضه انتخاب شده است (Hatfield and Prueger, 2010). میزان نیاز تعریف شده برای هر یک از انواع شاخص‌های چندمتغیره در حوضه متفاوت است. این سطح نیاز به‌عنوان مرزی تلقی می‌شود که در صورت افت شاخص به زیر آن،

Table 2- The required or acceptable level of the multivariate water resources index in the sub-basins of the Zayanderood basin

جدول ۲- سطح مورد نیاز یا قابل قبول شاخص چند متغیره منابع آب در زیرحوضه‌های حوضه زاینده‌رود

Sub-basin	MWRI	Demand
Buin-Miandasht	P-ASW-AGW	0.22
Lenjanat	P-ASW-AGW	0.2
Najafabad	P-ASW-AGW	0.23
Esfahan-Borkhar	P-ASW-AGW	0.18
Kuhpaye-Segzi	P-ASW-AGW	0.21

سگری است. این مقادیر بر اساس شاخص چند متغیره منابع آب استخراج شده‌اند. همان‌طور که در قسمت روش تحقیق ذکر شد، مقدار پارامتر شاخص پایداری بر اساس رابطه (۱۴) بدست خواهد آمد.

مرحله بعدی در تعیین شاخص پایداری منابع آب، برآورد مقادیر سه مؤلفه اصلی شامل قابلیت اطمینان، بازگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و در نهایت محاسبه شاخص نهایی پایداری است. جدول (۳) شامل نتایج به‌دست‌آمده از این محاسبات برای هر یک از زیرحوضه‌های بوئین‌میاندشت، لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه

Table 3- Reliability, reversibility, vulnerability, and sustainability index in sub-basins of the Zayandehrood basin

جدول ۳- شاخص‌های قابلیت اطمینان، برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری در زیرحوضه‌های حوضه زاینده‌رود

Sub-basin	Reliability	Resilience	Vulnerability	Sustainability Index
Buin-Miandasht	0.95	0.24	0.15	0.58
Lenjanat	0.94	0.09	0.27	0.4
Najafabad	0.88	0.14	0.2	0.46
Esfahan-Borkhar	0.88	0.12	0.2	0.44
Kuhpaye-Segzi	0.89	0.14	0.23	0.46

نرمال (P-Value) برای هر یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه است. مقادیر منفی Z_s بیانگر وجود روند کاهشی در سری‌های زمانی هستند. همچنین، طبق ویژگی‌های توزیع نرمال، احتمال مقادیر کمتر از ۴- بسیار ناچیز و تقریباً صفر و احتمال مقادیر بیش از ۴+ تقریباً برابر با یک است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، در زیرحوضه بوئین‌میاندشت، شاخص چندمتغیره دارای روندی افزایشی هستند. ولی در همه زیرحوضه‌های پائین‌دست سد زاینده‌رود شاخص چند متغیره دارای روند کاهشی هستند.

همان‌طور که در بخش پیشین اشاره شد، از جمله ابتکارات این پژوهش، افزودن یک پارامتر چهارم به شاخص چندمتغیره منابع آب است که با عنوان "روند یا شیب سری زمانی" شناخته می‌شود. این پارامتر از طریق آزمون من-کندال استخراج می‌شود. در ادامه، نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه روند زمانی شاخص‌های چندمتغیره منابع آب ارائه خواهد شد. جدول (۴) حاوی مقادیر آماره من-کندال (S)، مقدار استاندارد شده آن (Z_s) و احتمال متناظر با Z_s بر اساس توزیع

Table 4- Mann-Kendall statistic (S), standardized test statistic (ZS), and the normal probability (P-Value) of the standardized test in the sub-basins of the Zayandehrood basin

جدول ۴- آماره من-کندال (S)، آماره آزمون استاندارد (ZS) و احتمال نرمال (P-Value) آزمون استاندارد در زیرحوضه‌های حوضه

Sub-basin	S	Zs	P-Value
Buin-Miandasht	133	0.07	0.53
Lenjanat	-20729	-9.12	10 ⁻⁹
Najafabad	-20261	-8.92	10 ⁻⁸
Esfahan-Borkhar	-28767	-12.66	10 ⁻¹²
Kuhpaye-Segzi	-12658	-6.15	10 ⁻⁶

این طبقات به صورت ۰ تا ۰/۲۵، ۰/۲۵ تا ۰/۵، ۰/۵ تا ۰/۷۵ و ۰/۷۵ تا ۱ تعریف می‌شوند؛ بنابراین، شاخص پایداری اصلاح‌شده، بر اساس ضرب این دو توزیع در چهار رده مختلف قابل دسته‌بندی است. برای تعیین بازه‌های این شاخص، تعداد ۱۰ میلیون عدد تصادفی با توزیع یکنواخت تولید و سپس با مجموعه‌ای مشابه ضرب شده و درصد‌های حاصل مورد تحلیل قرار می‌گیرند. جدول (۵) این بازه‌بندی‌ها را در قالب سطوح مختلف پایداری حوضه نمایش می‌دهد.

شاخص پایداری اصلاح‌شده بر مبنای سه عامل کلیدی شامل قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری و میزان آسیب‌پذیری، به همراه شیب یا روند تغییرات در سری‌های زمانی، قابل محاسبه است. با استفاده از سری زمانی مختلف که نتایج آن‌ها ارائه شد، امکان ارزیابی این شاخص در زیرحوضه‌های بوئین‌میاندشت، نجف‌آباد، اصفهان-برخوار، لنجانات و کوهپایه-سگری فراهم می‌شود. بر پایه فرمول ارائه‌شده برای شاخص اصلاح‌شده پایداری، می‌توان استنباط کرد که این شاخص حاصل ضرب دو توزیع یکنواخت مستقل است. اگر بازه توزیع یکنواخت بین صفر تا یک به چهار بخش تقسیم شود،

Table 5- Categorization of the Modified Sustainability Index

جدول ۵- دسته‌بندی شاخص پایداری اصلاح‌شده

Categorization of the Modified Sustainability Index	Status
Unacceptable	0-0.068
Moderate	0.068-0.187
Acceptable	0.187-0.362
Ideal	0.362-1

اصفهان-برخوار در وضعیت ناپایدار و غیرقابل قبول قرار گرفته‌اند. این یافته حاکی از آن است که این دو زیرحوضه از منظر پارامترهای بارندگی، ذخایر آب سطحی و منابع آب زیرزمینی با ناپایداری مواجه هستند. بررسی زیرحوضه لنجانات نشان می‌دهد که از منظر شاخص وضعیت پایداری تری دارد، این موضوع بیانگر آن است که کاهش بارندگی و افت ذخایر آب سطحی، عوامل اصلی ناپایداری در این ناحیه هستند، در حالی که منابع آب زیرزمینی از ثبات نسبی برخوردارند. در زیرحوضه کوهپایه سگری شرایط متفاوتی را تجربه می‌کند؛ به‌گونه‌ای که شاخص آب سطحی در آن در وضعیت پایدار و ایده‌آل قرار دارد. در نتیجه، می‌توان گفت ناپایداری مشاهده‌شده در این منطقه عمدتاً ناشی از افت منابع آب زیرزمینی و کاهش بارندگی است، در حالی که از منظر ذخایر آب سطحی وضعیت باثباتی دارد.

مرحله نهایی در محاسبه شاخص پایداری اصلاح‌شده شامل اعمال رابطه (۱۵) است. در این رابطه، مقدار شاخص پایداری محاسبه‌شده بر پایه روش ارائه‌شده توسط Sandoval-Solis et al. (2011)، در مقدار احتمال نرمال ضرب می‌شود. با بهره‌گیری از این رویکرد، سه مؤلفه کلیدی شامل قابلیت اعتماد، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری برای هر یک از زیرحوضه‌ها و با استفاده از شاخص چند متغیره منابع آب محاسبه شده است. بر اساس رابطه (۱۵) معیار شیب روند نیز با استفاده از تابع توزیع نرمال P(Z) تعیین می‌شود. مقادیر حاصل از این تابع در جدول (۶) برای کلیه زیرحوضه‌ها ارائه شده است. در نهایت، شاخص پایداری اصلاح‌شده با ترکیب این معیارها به دست می‌آید. مطابق جدول (۶)، زیرحوضه بوئین‌میاندشت در وضعیت مطلوب یا قابل قبول قرار دارد که بر اساس طبقه‌بندی جدول (۵) تأیید می‌شود. در مقابل، دو زیرحوضه نجف‌آباد و

Table 6- Values of the Sustainability Index, Normal Probability, and Modified Sustainability Index Based on Multivariate Indicators by Sub-basins of the Zayandehrood basin

جدول ۶- مقادیر شاخص پایداری، احتمال نرمال و شاخص پایداری اصلاح شده بر اساس شاخص‌های چند متغیره به تفکیک

زیرحوضه‌های حوضه زاینده‌رود

Sub-basin	Sustainability Index	P-Value	Modified Sustainability Index
Buin-Miandasht	0.58	0.53	0.31
Lenjanat	0.4	10^{-9}	4×10^{-10}
Najafabad	0.46	10^{-8}	4.6×10^{-9}
Esfahan-Borkhar	0.44	10^{-12}	4.4×10^{-13}
Kuhpaye-Segzi	0.46	10^{-6}	4.6×10^{-7}

برجسته است و در سیاست‌گذاری‌ها باید به‌طور جدی مدنظر قرار گیرد.

شاخص پایداری منابع آب توسعه‌یافته در این پژوهش، با توجه به استفاده از پارامترهای کلیدی همچون بارش، حجم آب سطحی و تغییرات ذخایر آب زیرزمینی، ابزاری جامع و قابل اندازه‌گیری برای ارزیابی وضعیت پایداری منابع آب در حوضه زاینده‌رود ارائه می‌دهد. این شاخص به مدیران و سیاست‌گذاران امکان می‌دهد تا با شناخت دقیق‌تر نقاط ضعف و قوت منابع آب، برنامه‌های مدیریت بهینه‌تری را طراحی و اجرا کنند. علاوه بر این، ساختار انعطاف‌پذیر این شاخص، قابلیت تطبیق و تعمیم به سایر حوضه‌های آبریز با شرایط اقلیمی و جغرافیایی متفاوت را فراهم می‌کند، به‌طوری که می‌توان پارامترهای شاخص را متناسب با ویژگی‌های محلی هر منطقه اصلاح کرد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شاخص چندمتغیره منابع آب برای ارزیابی وضعیت پایداری منابع آبی در زیرحوضه‌های مختلف حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شد. این شاخص با تکیه بر سه پارامتر اصلی بارندگی، حجم آب سطحی در دسترس و حجم آب زیرزمینی در دسترس محاسبه می‌شود. داده‌های موردنیاز برای محاسبه این شاخص از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در منطقه جمع‌آوری شد و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و روش‌های درون‌یابی مکانی، میانگین بارندگی و حجم آب سطحی در هر زیرحوضه برآورد شد. همچنین، محاسبه حجم آب زیرزمینی با استفاده از اندازه‌گیری‌های سطح ایستابی و مدل‌های شبیه‌سازی انجام شد. انتخاب این سه پارامتر بر پایه مطالعات پایداری منابع آب و در نظر گرفتن ماهیت تلفیقی منابع آب در حوضه زاینده‌رود صورت گرفته است. این پارامترها نمایانگر ورودی، وضعیت سطحی و زیرزمینی منابع آب هستند. با این حال، در مطالعات بعدی می‌توان شاخص‌های اجتماعی، اقتصادی یا بهره‌برداری (مصرف کشاورزی، صنعتی و

به‌منظور بررسی میزان انطباق نتایج مدل با واقعیت‌های منطقه‌ای، مقادیر حاصل از شاخص‌های چندمتغیره منابع آب و شاخص پایداری اصلاح‌شده با شرایط مشاهده‌شده در حوضه آبریز زاینده‌رود تطبیق داده شدند. گزارش‌های میدانی مربوط به خشکسالی‌های دوره‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۴، ۱۳۹۸-۱۳۹۷ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹، و افت محسوس سطح آب زیرزمینی در نواحی پایین‌دست سد، با نتایج مدل کاملاً هم‌راستا بودند. به‌ویژه، پایین بودن شاخص پایداری در زیرحوضه‌های نجف‌آباد و اصفهان برخوردار به‌خوبی منعکس‌کننده بحران‌های آبی ثبت‌شده در این مناطق است؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل ارائه‌شده، از توانایی مناسبی برای بازتاب وضعیت واقعی منطقه برخوردار است. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، زیرحوضه بوئین‌میاندشت (بالادست سد زاینده‌رود) با شاخص پایداری برابر ۰/۳۱ در وضعیت قابل قبول قرار دارد. زیرحوضه‌های لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان برخوردار و کوهپایه سگزی به ترتیب با شاخص MSI برابر با 4×10^{-10} ، 4.6×10^{-9} ، 4.4×10^{-13} و 4.6×10^{-7} است. بر اساس شاخص پایداری^{۱۱} (SI) تمامی زیرحوضه‌ها دارای پایداری نسبی هستند و با اضافه شدن پارامتر شیب فقط زیرحوضه بالادست سد دارای پایداری نسبی است.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های پایین‌دست سد زاینده‌رود با چالش‌های جدی‌تری در کاهش منابع آب مواجه هستند که علت اصلی آن تفاوت‌های طبیعی و مدیریتی میان مناطق بالادست و پایین‌دست است. عوامل انسانی مانند برداشت‌های غیرمجاز آب، تغییرات کاربری اراضی و ناکارآمدی در مدیریت منابع آبی، نقش مهمی در کاهش پایداری منابع آب در این مناطق ایفا می‌کنند. همچنین، توزیع نامتوازن بارش و کاهش ذخایر آب زیرزمینی به دلیل بهره‌برداری بیش از حد در زیرحوضه‌های پایین‌دست، وضعیت پایداری آن‌ها را نسبت به بالادست‌ها آسیب‌پذیرتر کرده است؛ بنابراین، علاوه بر عوامل طبیعی، تأثیرات مدیریتی و انسانی در تفاوت وضعیت پایداری بین زیرحوضه‌ها بسیار

شرب) را نیز اضافه نمود تا شاخص جامع‌تری حاصل شود. دلیل تمرکز بر این سه مؤلفه، در دسترس بودن داده‌های طولانی مدت و قابل اتکاست.

در گام نخست، برای محاسبه شاخص چند متغیره منابع آب، ضرایب وزنی هر کدام از سه پارامتر ذکر شده با استفاده از روش‌های آنتروپی، مقیاسی و آنتروپی اصلاح‌شده استخراج شد. به‌طور خاص، این ضرایب برای پنج زیرحوضه شامل بوئین‌میاندشت، لنجانان، نجف‌آباد، اصفهان-برخوار و کوهپایه سگزی محاسبه شد. سپس، با استفاده از این ضرایب، سری زمانی شاخص‌های مربوطه محاسبه و نتایج به‌صورت ماهانه از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۲ ارائه شد.

شاخص پایداری در این تحقیق با بهره‌گیری از سه مؤلفه اصلی شامل قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری که به کمک شاخص‌های چندمتغیره منابع آب ارزیابی شدند، محاسبه شد. این شاخص‌ها برای هر یک از زیرحوضه‌ها به تفکیک محاسبه و نتایج نشان داد که زیرحوضه بوئین‌میاندشت در وضعیت پایدار قرار دارد، در حالی که دیگر زیرحوضه‌ها به‌ویژه در پایین‌دست سد زاینده‌رود با مشکلاتی نظیر کاهش بارندگی و افت ذخایر آب مواجه هستند.

یکی از ابتکارات این پژوهش، افزودن پارامتر "روند یا شیب سری زمانی" به شاخص پایداری بود. این پارامتر از طریق آزمون من-کندال برای بررسی روند تغییرات سری زمانی شاخص‌های منابع آب محاسبه شد. نتایج این آزمون نشان داد که در زیرحوضه بوئین‌میاندشت روند افزایشی در شاخص منابع آب وجود دارد، در حالی که در دیگر زیرحوضه‌ها روند کاهشی مشاهده شد. این نشان‌دهنده کاهش منابع آب در این نواحی است.

شاخص پایداری اصلاح‌شده که ترکیبی از سه مؤلفه کلیدی قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، به همراه شیب سری زمانی است، در این تحقیق به‌طور کامل محاسبه و تحلیل شد. این شاخص برای هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شده و بر اساس طبقه‌بندی خاصی، وضعیت هر زیرحوضه تعیین شد. طبق این طبقه‌بندی، زیرحوضه بوئین‌میاندشت در وضعیت "قابل قبول" قرار گرفت، در حالی که زیرحوضه‌های نجف‌آباد و اصفهان-برخوار در وضعیت "غیرقابل قبول" و ناپایدار قرار داشتند.

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده وضعیت ناپایدار منابع آب در بسیاری از زیرحوضه‌ها به‌ویژه در پایین‌دست سد زاینده‌رود است. کاهش

بارندگی و افت منابع آب سطحی از جمله عوامل ناپایداری در این مناطق هستند. همچنین، این تحقیق پیشنهاد می‌کند که برای بهبود مدیریت منابع آب در این حوضه، اقدامات اساسی در جهت افزایش ذخایر آب زیرزمینی و بهبود مدیریت منابع آب سطحی انجام شود. از طرف دیگر، توجه به شیب روند تغییرات منابع آب در هر زیرحوضه می‌تواند به شناسایی نقاط بحرانی و برنامه‌ریزی‌های مؤثر برای حفظ پایداری منابع آبی کمک کند.

در این پژوهش، شاخص پایداری منابع آب به‌عنوان ابزاری کمی و کیفی در مدیریت بهینه منابع آب حوضه زاینده‌رود مطرح شده است. استفاده از این شاخص می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان کمک کند تا وضعیت پایداری منابع آب را بهتر ارزیابی کرده و برنامه‌های مدیریت را هدفمندتر طراحی کنند. با این حال، برخی مفروضات و محدودیت‌ها در این تحقیق وجود دارد که باید در نظر گرفته شوند. از جمله مفروضات اصلی می‌توان به ثبات نسبی شرایط اقلیمی و پایایی داده‌های مورد استفاده اشاره کرد. همچنین، محدودیت‌هایی مانند عدم دسترسی به برخی داده‌های دقیق انسانی و مدیریتی، می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود نقش مداخلات انسانی مانند کشاورزی، مدیریت مصرف آب، تغییرات کاربری زمین و همچنین، اثرات تغییرات اقلیمی بر پایداری منابع آب با دقت بیشتری بررسی شود. این مطالعات می‌تواند به توسعه شاخص‌های دقیق‌تر و کاربردی‌تر در شرایط مختلف اقلیمی و مدیریتی کمک کند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Modified Sustainability Index
- 2- Multivariate Water Resources Index
- 3- Mann-Kendall
- 4- Precipitation
- 5- Available Surface Water
- 6- Available Ground Water
- 7- Normalized Difference Vegetation Index
- 8- Mann-Whitney
- 9- Entropy Weight
- 10- Precipitation-Available Surface Water-Available Ground Water
- 11- Sustainability Index

۶- منابع

- Ajami NK, Hornberger GM, Sunding DL (2008) Sustainable water resource management under hydrological uncertainty. *Water Resources Research* 44(11):1-10
- Ashofteh PS, Bozorg Haddad O, Akbari-Alashti H, Mariño MA (2014) Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 141(4):04014059
- Ashoori N, Dzombak DA, Small MJ (2015) Sustainability review of water-supply options in the Los Angeles region. *Journal of Water Resources Planning and Management* 141(12):4015005
- Borghi AD, Strazza C, Gallo M, Messineo S, Naso M (2013) Water supply and sustainability: life cycle assessment of water collection, treatment and distribution service. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18:1158-1168
- Brown CM, Lund JR, Cai X, Reed PM, Zagona EA, Ostfeld A, Hall J, Characklis GW, Yu W, Brekke L (2015) The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management. *Water Resources Research* 51:6110-6124
- Cai X, McKinney DC, Lasdon LS (2002) A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. *Water Resources Research* 38(6):1-21
- Cao G, Zheng C, Scanlon BR, Liu J, Li W (2013) Use of flow modelling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain. *Water Resources Research* 49:159-175
- Collet L, Ruelland D, Estupina VB, Dezetter A, Servat E (2015) Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a meso-scale Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment* 536:589-602
- Fogg GE, LaBolle EM (2006) Motivation of synthesis, with an example on groundwater quality sustainability. *Water Resources Research* 42(3):1-5
- Folke C (2006) Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16(3):253-267
- Fowler HJ, Kilsby CG, O'Connell PE (2003) Modelling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resources Research* 39(8):1222
- Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1):14-20
- Hatfield JL, Prueger JH (2010) Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. *Remote Sensing* 2(2):562-578
- IPCC (Intergovernmental panel on climate change, summary for policymakers in climate change) 2007: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, van der Linden P J, Hanson C E, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ishak EH, Rahman A, Westra S, Sharma A, Kuczera G (2013) Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. *Journal of Hydrology* 494(28):134-145
- Karamouz M, Mohammadpour P, Mahmoodzadeh D (2017) Assessment of sustainability in water supply-demand considering uncertainties. *Water Resources Management* 31:3761-3778
- Kendall MG, (1975) *Correlation Methods*. Griffin, London, UK.
- Khoshoei M, Safavi HR (2023) Developing the drought index in natural and engineering sub-basins (Case Study: Zayandehrood Basin). *Iran-Water Resources Research* 19(4):48-61 (In Persian)
- Klemes V, Srikanthan R, McMahon TA (1981) Long-memory flow models in reservoir analysis: What is their practical value? *Water Resources Research* 17(3):737-751
- Kulkarni A, Von Storch H (1995) Monte Carlo experiments on the effect of serial correlation on the Mann-Kendall test of trend. *Meteorologische Zeitschrift* 4(2):82-85
- Kundzewicz ZW (1997) Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):467-480
- Lane BA, Sandoval-Solis S, Porse EC (2014) Environmental flows in a human-dominated system: integrated water management strategies for the Rio Grande/Bravo basin. *River Research and Applications* 31(9):1053-1065
- Leite F B V D M, Bertolo LS, Santos RF (2016) Practices and perceptions on water resource sustainability in ecovillages. *Water Resources Research* 52(8):6004-6017
- Loucks DP (1994) Sustainability implications for water resources planning and management. *Natural Resources Forum* 18(4):263-274
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques* 42(4):513-530
- Loucks DP, Gladwell J S (1999) *Sustainability criteria for water resources systems*. Cambridge: Cambridge University Press

- Loucks DP (2000) Sustainable water resources management. *Water International* 25(1):3-10
- Loucks DP, van Beek E (2005) Water resources systems planning and management, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Paris, France
- Loucks DP, van Beek E (2017) Water resource systems planning and management: An introduction to methods. Models and Applications. Springer
- MacEwan D, Cayar M, Taghavi A, Mitchell D, Hatchett S, Howitt R (2017) Hydroeconomic modeling of sustainable groundwater management. *Water Resources Research* 53(3):2384–2403
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13(3):245–259
- Mays LW, (2006) *Water Resources Sustainability*. McGraw-Hill Professional
- Moy WS, Cohon JL, Revelle CS (1986) A programming model for analysis of reliability, resilience and vulnerability of a water supply reservoir. *Journal of Water Resources Research* 22(4):2135–2141
- McMahon TA, Adebayo J, Sen-Lin Z (2006) Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology* 324(1):359–382
- Mendoza VM, Villanueva EE, Adem J (1997) Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. *Climate Research Journal* 9(1):139-145
- National Research Council (1999) *Our common journey: A transition toward sustainability*. Washington, DC: National Academy Press
- Raju KS, Duckstein L, Arondel C (2000) Multicriterion analysis for sustainable water resources planning: A case study in Spain. *Water Resources Management* 14:435–456
- Richter BD, Mathews R, Harrison DL, Wigington R (2003) Ecologically sustainable water management: Managing River flows for ecological integrity. *Ecological Applications* 13(1):206–224
- Rouse JW, Hass RH, Deering DW, Shehell JA (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep, Rsc: 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A & M University, College Station
- Safavi HR, Golmohammadi MH, Sandoval-Solis S (2016) Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin. *Journal of Hydrology* 539:625-639
- Sampson DA, Quay R, White DD (2016) Anticipatory modelling for water supply sustainability in Phoenix, Arizona. *Environmental Science and Policy* 55(1):36–46
- Sandoval-Solis S, McKinney DC, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381-390
- Sophocleous M (2000) From safe yield to sustainable development of water resources the Kansas experience. *Journal of Hydrology* 235(1-2):27–43
- Staben N, Hein A, Kluge T (2010) Measuring sustainability of water supply: Performance indicators and their application in a corporate responsibility report. *Water Science and Technology: Water Supply* 10(5):824–830
- Von Storch H (1995) Misuses of statistical analysis in climate research. In: *analysis of climate variability: Applications of statistical techniques* (ed. by H. von Storch & A. Navarra), 11–26, Springer-Vorlage, Berlin, Germany.
- WCED (World Commission on Environment and Development) (1987) *Our Common Future*. Oxford University Press
- WHO-World Health Organization (2009) *Summary and policy implications Vision 2030: The resilience of water supply and sanitation in the face of climate change*. 2030
- Yue SH, Pilon P, Phinney B (2003) Canadian streamflow trend detection: Impacts of serial and cross-correlation. *Hydrological Science* 48(1):51-63