تحقیقات منابع آب ایران
انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران

ارزیابی پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز زاینده‌رود

مهرداد خشوعی[1*] و حمیدرضا صفوی[2]

[1*] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان. m.khoshoei@kashanu.ac.ir
[2] استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان. hasafavi@cc.iut.ac.ir

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 گردید. 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 حالی‌که 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.

ویراستاری نشده و غیر قابل استناد

مقدمه:

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 محیط زیست 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 زیست‌محیطی، 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، به عنوان 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 محیط زیست 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 می‌باشد 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 محیط زیست دارند و سرمایه‌های اجتماعی که از فرهنگ‌ها، نهادها و نظام‌های حکومتی نشأت می‌گیرند. (Folke, 2006). ظرفیت محیط زیست 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 نیازهای انسانی ایفا می‌کنند. مطابق با اصول توسعه پایدار، استفاده از این سرمایه‌ها توسط نسل کنونی باید به گونه‌ای 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 می‌باشد: 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، به ویژه در زمینه سرمایه‌های طبیعی که نقش کلیدی در تأمین نیازهای بشر دارند اما با خطر کاهش یا نابودی مواجه‌اند. به منظور بهبود مدیریت منابع آبی و

ویراستاری شناسه عبرقابل استناد

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 مرتبط با سرمایه‌گذاری در این حوزه را فراهم می‌آورند. به این ترتیب، با بهره‌گیری از این معیارها، می‌توان تصمیم‌گیری‌ها را به صورت سیستماتیک‌تر 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 به‌منظور 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 به‌عنوان طراحی و مدیریت سیستم‌های آبی که به تمامی جنبه‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی در حال و آینده توجه داشته باشد، تعریف کردند. Mays (2006) پایداری منابع آب را به‌عنوان 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 زیست‌محیطی در مقیاس‌های مختلف، از زیرحوضه‌ها تا مقیاس جهانی، و حفاظت از انسان در برابر بلایای طبیعی و انسانی مرتبط با آب می‌باشد. 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 زیست‌محیطی 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 می‌باشد و حکمرانی به نقش نهادهای دولتی، بخش‌های اقتصادی و جامعه مدنی می‌پردازد. لاکس و گلدول در سال ۱۹۹۹ 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 به‌طور 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 می‌باشد. این رویکرد باید شامل منابع آبی، اجزای هیدرولوژیکی و سیستم‌های زیست‌محیطی، 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 زیست‌محیطی 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 زیست‌محیطی، 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 زیست‌محیطی 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. Staben et al. (2010) شاخص‌هایی برای ارزیابی عملکرد ذخایر آب ارائه دادند و چارچوبی جامع برای گزارش‌دهی در مورد مسئولیت اجتماعی و زیست‌محیطی مرتبط با ذخایر آب طراحی کردند. Borghi et al. (2013) از یک مطالعه ارزیابی چرخه عمر برای تحلیل خدمات آب آشامیدنی در سیسیل ایتالیا بهره بردند. Cao et al. (2013) مدلی برای ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در دشت شمال چین ارائه کردند که بینشی برای مدیریت پایدار سایر آبخوان‌های آسیب‌دیده فراهم نمود.

Collet et al. (2015) پایداری ذخایر آب و راهبردهای انطباق را با توجه به تغییرات اقلیمی و آلودگی در یک زیرحوضه مدیترانه‌ای بررسی کردند. Ashoori et al. (2015) 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 زیست‌محیطی را در بر می‌گرفت. Brown et al. (2015) آینده تحلیل سیستم‌های منابع آب را با تمرکز بر چارچوب علمی مدیریت پایدار آب بررسی کردند. Leite et al. (2016) با استفاده از ۲۵ شاخص پایداری، روش‌هایی برای ارزیابی اهداف پایداری ارائه دادند. Sampson et al. (2016) در همان سال مدلی برای تجزیه‌وتحلیل منابع آب و تقاضا ارائه کردند که در مدیریت بحران‌هایی مانند خشکسالی و تغییرات اقلیمی در منطقه Phoenix کاربرد داشت. Karamouz et al. (2017) با استفاده از شاخص‌هایی نظیر برگشت‌پذیری، قابلیت اعتماد، و آسیب‌پذیری، پایداری منابع آب را بررسی کردند. MacEwan et al. (2017) نیز مدلی اقتصادی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در کالیفرنیا معرفی کردند که نقش مؤسسات مدیریتی را تحلیل می‌کرد.

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

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 محیط زیست تأکید دارد و هدف آن حفظ منابع طبیعی، از جمله منابع آبی، برای نسل‌های آینده می‌باشد. 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 زیست‌محیطی 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.

Loucks (1997) 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 کارآیی 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 می‌باشد. این شاخص برای نخستین بار توسط Hashimoto et al. (1982) 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. Sandoval-Solis et al. (2011) 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، Safavi et al. (2016) 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 (MSI) برای ارزیابی وضعیت منابع آب حوضه زاینده‌رود است. در ادامه، به اهمیت استفاده از شاخص پایداری پرداخته می‌شود و معیارهای اصلی مانند

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

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 می‌باشد. در این تحقیق، شاخص چندمتغیره منابع آب (MWRI) با سه مؤلفه اصلی پایداری شامل قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری ترکیب شده و سپس با افزودن روند زمانی شاخص بر اساس آزمون (Mann-Kendall) به شاخص پایداری اصلاح‌شده (MSI) تبدیل گردیده 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.

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(MWRI) ، تحلیل روند زمانی، ارزیابی معیارهای عملکرد سیستم و در نهایت محاسبه شاخص پایداری اصلاح‌شده (MSI) است. هدف از این نمودار، ارائه تصویری شفاف از ساختار منطقی تحقیق برای سهولت در تبیین و پیاده‌سازی روش پیشنهادی می‌باشد. شکل ۱ روند محاسبه شاخص چند متغیره منابع آب نشان داده شده است. در این تحقیق از سه پارامتر ورودی بارندگی، حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس 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.

ویراستاری نشده و غیر قابل استناد

تحقیقات منابع آب ایران
انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران

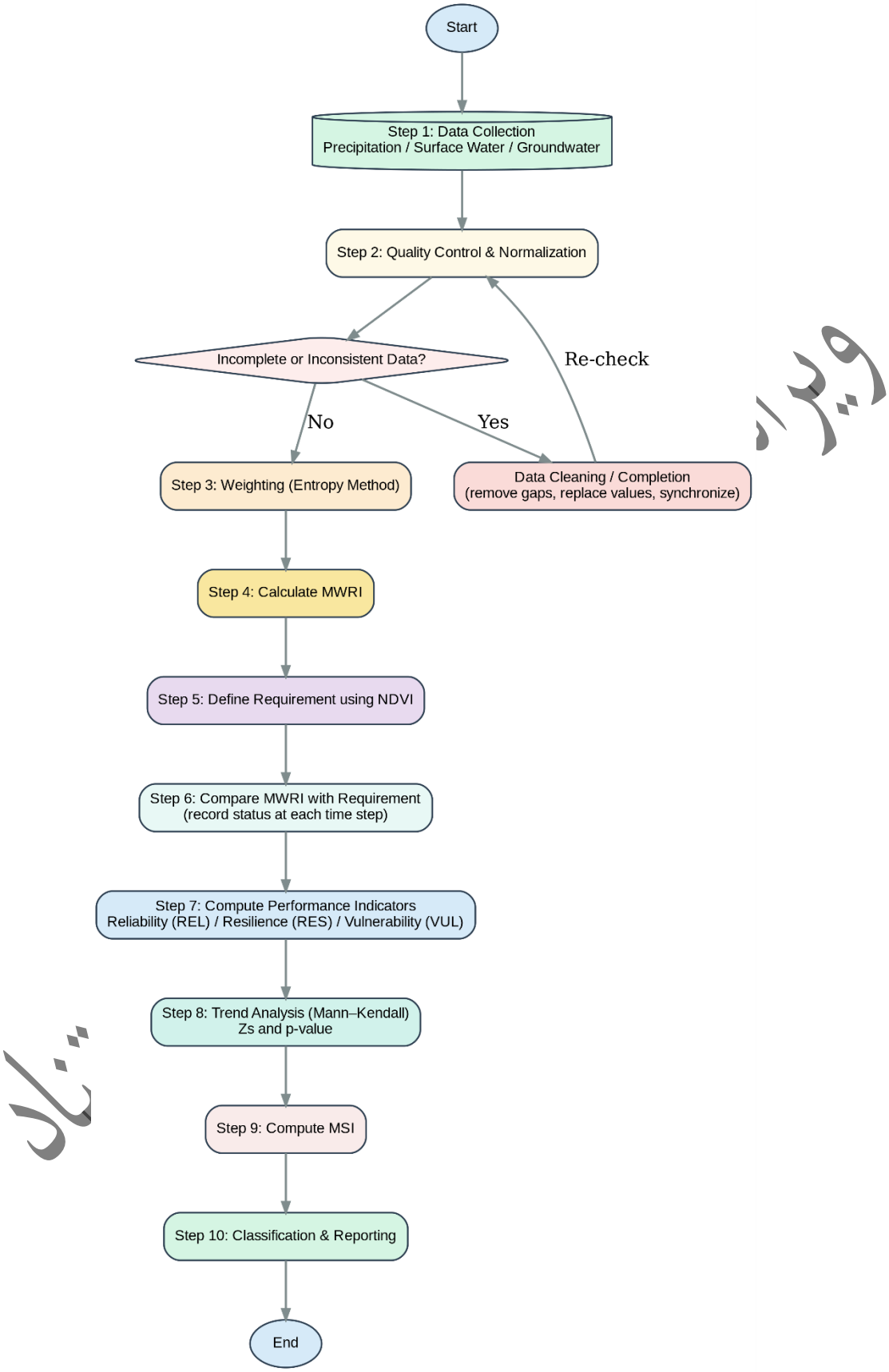

Figure (1): Flowchart of the study methodology including MWRI calculation, performance evaluation, trend analysis and MSI computation.

در این تحقیق ابتدا شاخص چند متغیره منابع آب (MWRI) براساس روابط وزن‌دهی آنتروپی محاسبه خواهد شد. این شاخص دارای پارامترهای ورودی بارندگی، حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس است. هرکدام از پارامترهای ورودی دارای وزن به‌خصوص می‌باشد. شاخص چند متغیره منابع آب براساس رابطه زیر بدست خواهد آمد: (Khoshoei and Safavi, 2023)

$$MWRI = W_1 \times \mathrm{P} + W_2 \times \mathrm{ASW} + W_3 \times AGW \quad (۱)$$

که در این رابطه $MWRI$ نشان دهنده شاخص چندمتغیره منابع آب، P مقدار بارندگی، ASW بیانگر حجم آب سطحی دردسترس و AGW معرف حجم آب زیرزمینی دردسترس است. همچنین W_1، W_2 و W_3 وزن آنتروپی اختصاص یافته به معرف‌های بارندگی، حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس می‌باشد (Khoshoei and Safavi, 2023). کلیه پارامترهای بارندگی، حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس بصورت مقادیر نرمال شده در رابطه (۱) استفاده خواهد شد. شاخص چند متغیره منابع آب (MWRI) براساس 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 به عنوان 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 (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، به عنوان درصدی از سری زمانی داده‌های NDVI تعریف می‌شود. به عبارتی، اگر درصدی از داده‌های NDVI کمتر از آستانه تعیین‌شده 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 به شمار 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 به‌صورت 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)

$$\mathrm{Requirement} = \mathrm{mean}(MWRI) \qquad [\mathrm{NDVI} \le \mathrm{X\%\ NDVI}] \quad (۲)$$

$$\mathrm{X\%\ NDVI} = \frac{\mathrm{X} \times (\mathrm{NDVI_{max}} - \mathrm{NDVI_{min}})}{100} + \mathrm{NDVI_{min}} \quad (۳)$$

$$MWRI = \begin{cases} \text{unsatisfactory} & MWRI < \text{Requirement} \\ \text{satisfactory} & \text{Requirement} < MWRI \end{cases} \quad (۴)$$

ویراستاری نشده و غیر قابل استناد

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 به طور 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):

$$\text{Reliability} = \frac{\#\ MWRI<\text{Requirement}}{\text{n}} \quad (۵)$$

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 به عنوان یک معیار آماری برای ارزیابی انعطاف‌پذیری سیستم نسبت به تغییرات محیطی و سیاست‌های مدیریتی مختلف به کار می‌رود (WHO 2009, IPCC, 2007). 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:

$$\text{RES} = \frac{\#\ MWRI>\text{Requirement after } MWRI<\text{Requirement}}{\#\ MWRI<\text{Requirement}} \quad (۶)$$

آسیب‌پذیری به طور 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.

ویراستاری نشده و غیر قابل استناد

$$\mathrm{VUL} = \frac{\sum(\mathrm{Requirement} - MWRI)/\#(MWRI < \mathrm{Requirement})}{\mathrm{Requirement}} \quad (۷)$$

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 روند، بر اساس آزمون من-کندال (MK Test) اصلاح می‌شود (Mann, 1945, Kendall, 1975). Kulkarni and von Storch (1995) و همچنین Von Storch (1995) از روش پیش‌سفیدسازی برای بررسی سری‌های زمانی و ارزیابی تأثیر خودهمبستگی در آزمون MK 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 به‌صورت زیر ارائه می‌شود (Ishak et al. 2013).

$$\mathrm{X_i} = MWRI_{\mathrm{j}} - \rho MWRI_{\mathrm{j-1}} \qquad \mathrm{i} = 1,2,\dots.,\mathrm{j}-1 \quad (۸)$$

در این معادله، $MWRI_{\mathrm{j}}$ نشان‌دهنده شاخص چندمتغیره منابع آب در دوره زمانی j است که با استفاده از معادله (۱) تعریف شده است. معادله (۸) بیانگر مدل خودهمبسته مرتبه اول برای شاخص خشکسالی است. آماره آزمون من-کندال (MK) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i-1}^{n} sign(X_j - X_i) \quad (۹)$$

در این رابطه n تعداد مؤلفه‌های شاخص چند متغیره منابع آب یا $MWRI$ها است. X بیانگر سری زمانی پیش سفید شاخص چند متغیره منابع آب و همچنین n تعداد داده های سری زمانی و sign به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$sign(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & (X_j - X_i) > 0 \\ 0 \quad if & (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (۱۰)$$

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

$$E(S) = 0 \quad (۱۱)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} = \sigma^2 \quad (۱۲)$$

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

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & for \quad s > 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & for \quad s < 0 \\ 0 & for \quad s = 0 \end{cases} \quad (۱۳)$$

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

که در این رابطه p(Z) برمبنای 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 براساس 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 می‌باشد (Lane et al. 2014). Sandoval-Solis et al (2011) شاخص پایداری را براساس سه معیار قابلیت اعتماد، برگشت پذیری و آسیب پذیری بصورت زیر بیان کردند:

$$SI = [REL \times RES \times (1 - VUL)]^{(\frac{1}{3})} \quad (۱۴)$$

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 Mann-Kendall برای محاسبه روند شاخص چند متغیره منابع آب بدست می‌آید. شاخص پایداری اصلاح شده (MSI) به صورت زیر بیان می شود:

$$MSI = p(z) \times [REL \times RES \times (1 - VUL)]^{(\frac{1}{3})} \quad (۱۵)$$

که در معادله (۱۵) p(Z) مقدار p-value مشتق شده با استفاده از آزمون Man-Whitney یک باله را برای شاخص چند متغیره منابع آب را نشان می دهد. مقدار احتمال نرمال Z_S به عنوان پارامتر شیب در این تحقیق معرفی خواهد شد، که عددی بین صفر و یک است.

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 میان‌حوضه‌ای 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 قابل‌توجهی از حوضه آبریز تالاب گاوخونی را شامل می‌شود که خود بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی ایران می‌باشد. 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.

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

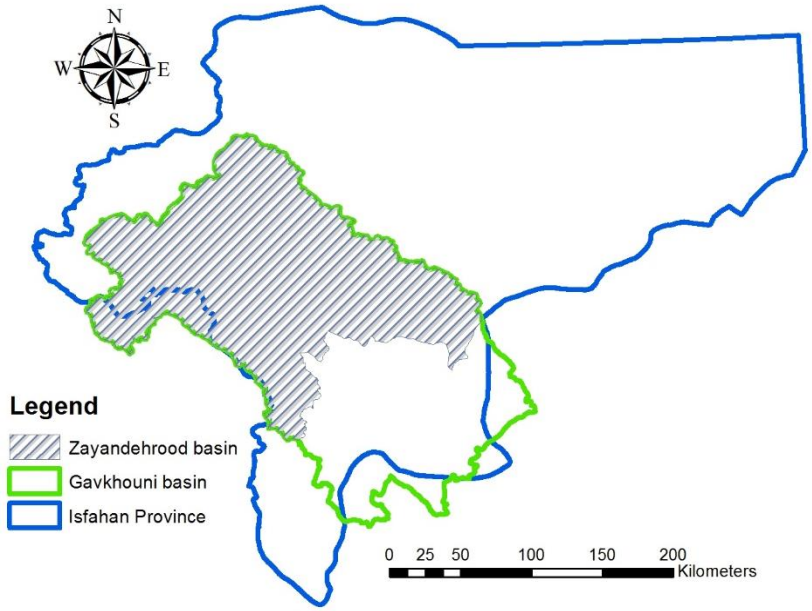

Figure (2): The intersection of the Zayandehrood basin with the Gavkhouni basin and the political boundaries of Isfahan Province.

پرآب‌ترین رود این حوضه، زاینده‌رود می‌باشد 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 دارد. آب این سد که در چادگان ذخیره می‌شود، با استفاده از رواناب‌های حاصل از بارندگی‌های فصول بهار و زمستان، به‌صورت جریانی کنترل‌شده به رودخانه آزاد می‌گردد.

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 زاینده‌رود مورد مطالعه قرار گرفت. این ۵ زیرحوضه شامل بوئین میاندشت، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی می‌باشد، که در شکل ۳ موقعیت این زیرحوضه‌ها نشان داده شده است. زیرحوضه بوئین میاندشت در بالادست سد زاینده‌رود و زیرحوضه‌های لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی در پائین دست سد زاینده‌رود واقع است.

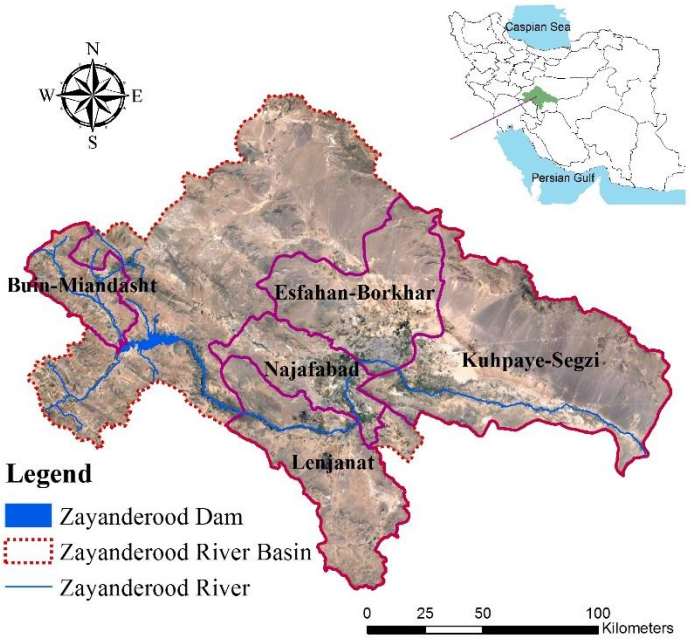

Figure (3): Location of Zayandehrood river basin, Zayandehrood dam, Buin-Miandasht sub-basin (upstream) and Lenjanat, Najafabad, Esfahan-Borkhar and Kuhpaye-Segzi sub-basins (downstream).

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

نتایج:

همانطور که بیان گردید، شاخص چند متغیره منابع آب براساس داده‌های ورودی شامل بارندگی، حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس 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 به عنوان معرف هواشناسی و از حجم آب سطحی دردسترس و همچنین حجم آب زیرزمینی دردسترس به عنوان معرف‌های هیدرولوژیکی استفاده خواهد شد. ابتدا به منظور محاسبه سری زمانی شاخص چند متغیره منابع آب، باید وزن‌های مربوط به هر کدام از متغیرها را براساس تئوری آنتروپی بدست آورد. همانطور که در شکل (۲) بیان گردید، از ۵ زیرحوضه در حوضه آبریز زاینده‌رود در این تحقیق استفاده خواهد شد که یک زیرحوضه در بالادست سد و ۴ زیرحوضه در پایین‌دست 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 گردید. سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار Arc GISو به‌کارگیری روش‌های درون‌یابی مکانی، میانگین بارندگی ماهانه برای زیرحوضه‌های بوئین‌میاندشت، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان–برخوار و کوهپایه–سِگزی 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، به‌دلیل دارا بودن داده‌های بلندمدت دبی رودخانه زاینده‌رود در ناحیه بالادست سد زاینده‌رود، به‌عنوان نماینده زیرحوضه بوئین‌میاندشت انتخاب شد. همچنین ایستگاه‌های پل کله، لنج، پل خواجو و پل چوم به ترتیب جهت برآورد حجم جریان سطحی در زیرحوضه‌های بوئین‌میاندشت، لنجانات،

نجف‌آباد، اصفهان–برخوار و کوهپایه–سگزی به‌کار گرفته شدند .محاسبه حجم آب زیرزمینی در دسترس نیز بر پایه تفاوت میان سطح پیزومتریک (یعنی 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 پیزومتریک 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 محیط GIS، میانگین سطح ایستابی در هر یک از پنج زیرحوضه مذکور برآورد گردید. 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 پیزومتریک و میانگین عمق سنگ بستر، ضرب در مساحت آبخوان مربوطه در هر زیرحوضه، محاسبه گردید.

نخستین گام در محاسبه شاخص چند متغیره منابع آب، تعیین ضرایب وزنی مؤلفه‌های ورودی این شاخص می‌باشد. این ضرایب وزنی با استفاده از روابط ارائه شده توسط Khoshoei and Safavi (2023) استخراج می‌شوند. به‌طور مشخص، وزن‌دهی 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)، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان–برخوار و کوهپایه–سگزی (واقع در پایین‌دست سد زاینده‌رود) مطابق رابطه (۱) محاسبه خواهد شد. در جدول (۱) مقدار عددی وزن آنتروپی (W_i) براساس شاخص چند متغیره منابع آب برپایه بارندگی، حجم آب سطحی دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس P-ASW-AGW در زیرحوضه‌های بوئین میاندشت، لنجانات، نجف آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی ارائه می‌گردد. 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 شاخصMWRI ، تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، وزن‌های محاسبه‌شده به‌طور سیستماتیک ±۱۰٪، ±۲۰٪ 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.

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

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

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

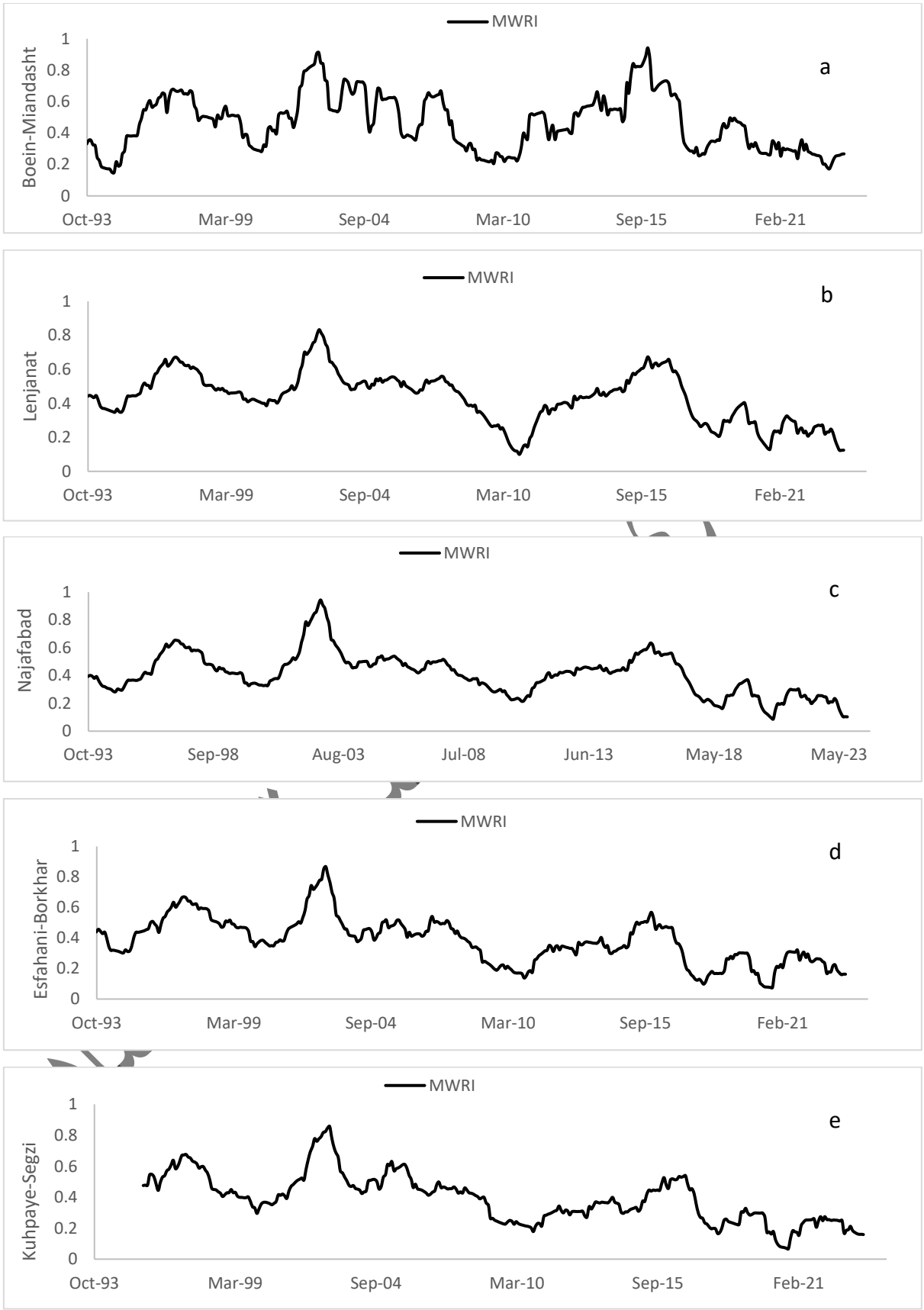

Figure 4: Multivariate Water Resources Index time series based on precipitation, surface water and groundwater (P-ASW-AGW) for (a) Buin-Miandasht, (b) Lenjanat, (c) Najafabad, (d) Esfahan-Borkhar and (e) Kuhpaye-Segzi sub-basins in the Zayandehrood river basin.

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 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 بوئین میاندشت (a) (بالادست سد زاینده‌رود)، لنجانات (b)، نجف‌آباد (c)، اصفهان برخوار (d) و کوهپایه سگزی (e) مورد معرفی قرار گرفت. نخستین مرحله در تعیین شاخص پایداری منابع آب، برآورد میزان نیاز یا سطح مطلوب شاخص چندمتغیره خشکسالی می‌باشد. 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.

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

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

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

مرحله بعدی در تعیین شاخص پایداری منابع آب، برآورد مقادیر سه مؤلفه اصلی شامل قابلیت اطمینان، بازگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری، و در نهایت محاسبه شاخص نهایی پایداری است. جدول (۳) شامل نتایج به‌دست‌آمده از این محاسبات برای هر یک از زیرحوضه‌های بوئین میاندشت، لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی است. این مقادیر بر اساس شاخص چند متغیره منابع آب استخراج شده‌اند. همانطور که در قسمت روش تحقیق ذکر گردید، مقدار پارامتر شاخص پایداری براساس رابطه (۱۴) بدست خواهد آمد.

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

Sub-basin	Reliability	Resilience	Vulnerability	Sustainability Index

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

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

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 می‌گردد. 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 براساس توزیع نرمال (P-Value) برای هر یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه می‌باشد. 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 پائین دست سد زاینده‌رود شاخص چند متغیره دارای روند کاهشی می‌باشند.

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

Sub-basin	S	Z_s	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}

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

ویراستاری شده غیر قابل استناد

Table 5: Categorization of the Modified Sustainability Index

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

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 (P-Value) 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 گردیده 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 به‌دست 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 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 پایداری‌تری دارد، ا این موضوع بیانگر آن است که کاهش بارندگی و افت ذخایر آب سطحی، عوامل اصلی ناپایداری در این ناحیه هستند، در حالی‌که منابع آب زیرزمینی از ثبات نسبی برخوردارند. در زیرحوضه کوهپایه سگزی 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 حالی‌که از منظر ذخایر آب سطحی وضعیت باثباتی دارد.

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

Sub-basin	Sustainability Index	P value	Modified sustaiability 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}	$4.6*10^{-7}$

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 ۱۳۹۴–۱۳۹۵، ۱۳۹۷–۱۳۹۸ و ۱۳۹۹–۱۴۰۰، 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 اصفهان‌برخوار 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 بوئین میاندشت (بالادست سد زاینده‌رود) با شاخص پایداری برابر ۰/۳۱ در وضعیت قابل قبول قرار دارد. زیرحوضه‌های لنجانات، نجف‌آباد، اصفهان برخوار و کوهپایه سگزی به ترتیب با شاخص MSI برابر با $۴/۶*۱۰^{-۱۰}$، $۴/۶*۱۰^{-۹}$، $۴/۴*۱۰^{-۱۳}$، $۴/۶*۱۰^{-۷}$ می‌باشد. براساس شاخص پایداری (SI) تمامی زیرحوضه‌ها دارای پایداری نسبی می‌باشند و با اضافه‌شدن پارامتر شیب فقط زیرحوضه بالادست سد دارای پایداری نسبی می‌باشد.

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 برجسته است و در سیاست‌گذاری‌ها باید به طور 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، به طوری که می‌توان پارامترهای شاخص را متناسب با ویژگی‌های محلی هر منطقه اصلاح کرد.

جمع بندی و نتیجه‌گیری:

در این تحقیق، شاخص چند متغیره 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 دردسترس و حجم آب زیرزمینی دردسترس محاسبه می‌شود. داده‌های مورد نیاز برای محاسبه این شاخص از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در منطقه جمع‌آوری شد و با استفاده از نرم‌افزار Arc GISو روش‌های درون‌یابی مکانی، میانگین بارندگی و حجم آب سطحی در هر زیرحوضه برآورد گردید. 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 شرب) را نیز اضافه نمود تا شاخص جامع‌تری حاصل شود. دلیل تمرکز بر این سه مؤلفه، در دسترس بودن داده‌های طولانی‌مدت و قابل اتکاست.

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد

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، لنجانات، 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 چند متغیره منابع آب ارزیابی شدند، محاسبه گردید. این شاخص‌ها برای هر یک از زیرحوضه‌ها به تفکیک محاسبه و نتایج نشان داد که زیرحوضه بوئین‌میاندشت در وضعیت پایدار قرار دارد، در حالی‌که 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 حالی‌که در دیگر زیرحوضه‌ها روند کاهشی مشاهده گردید. این نشان‌دهنده کاهش منابع آب در این نواحی می‌باشد.

شاخص پایداری اصلاح‌شده که ترکیبی از سه مؤلفه کلیدی قابلیت اعتماد، بازگشت‌پذیری، و آسیب‌پذیری، به‌همراه 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 گردید. طبق این طبقه‌بندی، زیرحوضه بوئین‌میاندشت در وضعیت "قابل قبول" قرار گرفت، در حالی‌که 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 اصلی 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 کمّی 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 تاثیرگذار 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.

ویراستاری نشده غیر قابل استناد

مراجع:

Ajami, N. K., Hornberger, G. M., and Sunding, D. L., (2008) Sustainable water resource management under hydrological uncertainty., Water Resources Research, VOL. 44, W11406, doi:10.1029/2007WR006736.
Ashofteh, P. S., Haddad, O. B., Akbari-Alashti, H., Mariño, M. A. (2014) Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming." Journal of Irrigation and Drainage Engineering, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000807, 04014059.
Ashoori, N., Dzombak, D. A., and Small, M. J., (2015) Sustainability Review of Water-Supply Options in the Los Angeles Region., J. Water Resour Plann Manage, 141(12): A4015005.
Borghi, A. D., Strazza, C., Gallo, M., Messineo, S. and Naso, M., (2013) Water supply and sustainability: life cycle assessment of water collection, treatment and distribution service., Int J Life Cycle Assess. 18:1158–1168 doi: 10.1007/s11367-013-0549-5.
Brown, C. M., Lund, J. R., Cai, X., Reed, P. M., Zagona, E. A., Ostfeld, A., Hall, J., Characklis, G. W., Yu, W., and Brekke, L., (2015) The future of water resources systems analysis: Toward a scientific framework for sustainable water management., Water Resources Research, 51, 6110–6124, doi:10.1002/ 2015WR017114.
Cai, X., McKinney, D. C., and Lasdon, L. S., (2002) A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin., Water Resour. Res., VOL. 38, NO. 6, 1085, 10.1029/2001WR000214.
Cao, G., Zheng, C., Scanlon, B. R., Liu, J., and Li, W., (2013) Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain., Water Resources Research, VOL. 49, 159–175, doi:10.1029/2012WR011899.
Collet, L., Ruelland, D., Estupina, V. B., Dezetter, A., and 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, G. E., and LaBolle, E. M., (2006) Motivation of synthesis, with an example on groundwater quality sustainability., Water Resources Research, VOL. 42, W03S05, doi:10.1029/2005WR004372.
Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. Global Environmental Change, 16(3), 253–267. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002.
Fowler, H. J., Kilsby, C. G., and O'Connell, P. E., (2003) Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system., Water Resources Research, VOL. 39, NO. 8, 1222, doi:10.1029/2002WR001778.
Hashimoto, T., Stedinger J. R., Loucks, D. P.,(1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation., Water Resour. Res., VOL. 18, NO. 1, pages 14-20.
Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2010). Value of Using Different Vegetative Indices to Quantify Agricultural Crop Characteristics at Different Growth Stages under Varying Management Practices. *Remote Sensing*, 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., Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
Ishak, E. H., A. Rahman, S. Westra, A. Sharma, Kuczera, G., (2013) Evaluating the non-stationarity of Australian annual maximum flood. J. Hydrology, 494, 134-145.
Karamouz, M., Mohammadpour, P., and Mahmoodzadeh, D., (2017) Assessment of Sustainability in Water Supply-Demand Considering Uncertainties., Water Resour Manage, doi: 10.1007/s11269-017-1703-9.
Kendall, M. G., (1975) Correlation Methods. Griffin. London, UK.
Khoshoei, M., Safavi, H. R. (2023) Developing the Drought Index in Natural and Engineering Sub-basins (Case Study: Zayandehrood Basin), Iran Water Resources Research, 19(4): 48-61.
Klemes V, Srikanthan R, McMahon T. A. (1981) Longmemory flow models in reservoir analysis: What is their practical value? Water Resour. Res., 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. Met. Z. 4(2), 82–85.
Kundzewicz, Z. W., (1997) Water resources for sustainable development., Hydrological Sciences Journal, 42:4, 467-480, DOI: 10.1080/02626669709492047.
Lane, B. A., Sandoval-Solis, S., Porse, E. C. (2014) Environmental Flows in a Human-Dominated System: Integrated Water Management Strategies for the Rio Grande/Bravo Basin. River Research and Applications, DOI: 10.1002/rra.2804.

Leite, F. B. V. d. M, L. S. Bertolo, and Santos, R. F., (2016) Practices and perceptions on water resource sustainability in ecovillages., Water Resources Research, 52, 6004–6017, doi:10.1002/2015WR018117.
Loucks, D. P., (1994) Sustainability implications for water resources planning and management., Natural Resources Forum, 18: (4), 263-274.
Loucks, D. P., (1997) Quantifying trends in system sustainability., Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 42(4) August.
Loucks, D. P., and Gladwell, J. S., (1999) Sustanability Criteria for Water Resources Systems., Cambridge: Cambridge University Press.
Loucks, D. P., (2000) Sustainable Water Resources Management., Water International, Volume 25, Number 1, Pages 3.10.
Loucks, D. P., van Beek, E., (2005) Water resources systems planning and management, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, France, 2005.
Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. Springer.
MacEwan, D., M. Cayar, A. Taghavi, D. Mitchell, S. Hatchett, and Howitt, R., (2017) Hydroeconomic modeling of sustainable groundwater management., Water Resources Research, 53, 2384–2403, doi:10.1002/2016WR019639.
Mann, H. B., (1945) Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13, 245–259.
Mays, L. W., (2006) Water Resurces Sustainability., McGrow-Hill Professional.
Moy, W.S., Cohon, J. L., Revelle, C. S. (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, T. A., Adebayo, J., Sen-Lin, Z., (2006) Understanding performance measures of reservoirs. Journal of Hydrology, 324:359–382, 2006.
Mendoza, V. M., Villanuave, E. E., Adem, J., (1997) Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change. Climate Research Journal, 9:139-145.
National Research Council. (1999). Our Common Journey: A Transition Toward Sustainability. Washington, DC: National Academy Press. https://doi.org/10.17226/9690.
Raju, K. S., Duckstein, L., and Arondel, C., (2000) Multicriterion Analysis for Sustainable Water Resources Planning: A Case Study in Spain., Water Resour Manage, 14: 435–456.
Richter, B. D., Mathews, R, Harrison, D. L., and Wigington, R., (2003) Ecologically Sustainable Water Management: Managing River Flows for Ecological Integrity., Ecological Applications, 13(1), pp. 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, H.R., Golmohammadi, M. H., and Sandoval-Solis, S., (2016) Scenario analysis for integrated water resources planning and management under uncertainty in the Zayandehrud river basin., J. Hydrology, 539, 625-639.
Sampson, D. A., Quay, R and White, D. D., (2016) Anticipatory modeling for water supply sustainability in Phoenix, Arizona., Environmental Science & Policy, 55: 36–46.
Sandoval-Solis, S., McKinney, D. C., and Loucks, D. P., (2011) Sustainability Index for Water Resources Planning and Management., J. Water Resour. Plann. Manage, 137(5): 381-390.
Sophocleous, M., (2000) From safe yield to sustainable development of water resources the Kansas experience., Journal of Hydrology 235: 27–43.
Staben, N., Hein, A. and Kluge, T., (2010) Measuring sustainability of water supply: performance indicators and their application in a corporate responsibility report., Water Science & Technology: Water Supply—WSTWS, doi: 10.2166/ws.346.
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-Verlag, 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.
Yue, SH., Pilon, P. and Phinney, B., (2003) Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and cross-correlation. Hydrological Science, 48:1, 51-63.

ویراستاری شفیعی پور فارسی

تحقیقات منابع آب ایران
انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران

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

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 sustainability, three functional components of the system reliability, reversibility, and 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 (upstream of the dam) and four downstream sub-basins Lenjanat, Najafabad, Esfahan-Borkhar, and Kuhpayeh-Segzi. 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

ویرایشاری نشده، غیر قابل استناد