مدیریت آب و آبیاری
(نشریه علمی)
دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰
صفحه‌های ۶۳۲-۶۱۷
DOI: 10.22059/jwim.2021.327554.903

مقاله پژوهشی:

ارزیابی امنیت آبی ایران در سطح استانی با استفاده از شاخص ترکیبی

سینا سالمی سرمست[۱]، بنفشه زهرایی[۲*]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

چکیده
امنیت آبی رویکردی فراگیر در مدیریت منابع آب است که ارزیابی آن می‌تواند تصویر جامعی از وضعیت منابع آب و مشکلات ناشی از مدیریت این منابع ارائه کند. این رویکرد برای کشور ایران که درگیر مشکلات درهم تنیده در زمینه مدیریت منابع آب و محیط‌زیست است، می‌تواند راه‌گشا باشد. در این پژوهش ابتدا شاخص امنیت آبی استانی با استفاده از روش نیمه‌جبرانی تجمیع هندسی توسعه داده شد. برای این شاخص سه بعد کلیدی منابع، دسترسی و اقتصاد در نظر گرفته شده است. در نهایت استان‌های ایران با استفاده از این شاخص ارزیابی و رتبه‌بندی شدند که در این ارزیابی برای هر استان عددی بین صفر (برای بدترین وضعیت) و یک (برای بهترین وضعیت) به‌عنوان شاخص امنیت آبی محاسبه شد. نتایج این پژوهش مشخص کرد که مقدار شاخص امنیت آبی برای هیچ‌کدام از استان‌های ایران، بیش‌تر از ۰/۴۳ نمی‌شود که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب همه استان‌های ایران از منظر شاخص امنیت آبی است. استان‌های مرز شرقی و قسمت شرقی فلات مرکزی بدترین وضعیت‌ها را از منظر شاخص امنیت آبی دارند؛ استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان رضوی، خراسان جنوبی، یزد و کرمان استان‌هایی هستند که کم‌ترین مقادیر شاخص امنیت آبی برای آنها ثبت شده است (همگی کم‌تر از ۰/۲۲). استان مازندران با مقدار ۰/۴۳۲ در شاخص امنیت آبی، در رتبه اول قرار گرفته است، که دلیل اصلی آن وضعیت مطلوب این استان از منظر بعد منابع است. آذربایجان‌شرقی با کسب مقدار ۰/۴۱۶، به‌دلیل وضعیت متعادل و بالاتر از میانگین در همه ابعاد کلیدی امنیت آبی، در رتبه دوم قرار گرفته است. استان هرمزگان نیز با کسب مقدار ۰/۳۸۶، به‌دلیل ثبت بهترین وضعیت در بعد اقتصاد در جایگاه سوم قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: امنیت آبی، امنیت دسترسی به آب تجمیع هندسی، شاخص ترکیبی.

Assessment of Water Security in Iran at Provincial Level Using a Hybrid Index

Sina Salemi Sarmast[1], Banafsheh Zahraie[2*]
1. Graduate Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Received: July 21, 2021 Accepted: October 28, 2021

Abstract
Assessment of water security can be considered as a comprehensive approach towards analysis of status of water resources and water resource management practices. This approach can be especially helpful for Iran, which faces complex problems in the management of water and natural resources. In this paper, an index is developed for assessing the state of water security in Iranian provinces using the geometric mean as the aggregation method. Finally, the Iran provinces were ranked by this index and a number between 0 (for the worst condition) and 1 (for the best condition) is estimated as water surety index for each of them. The results indicated that the security index value can not be more than 0.43 for none of the provinces, which shows weak water security for all of the provinces. The provinces located on the eastern border and the eastern part of the central Iranian plateau, Sistan and Baluchestan, Khurasan Razavi, Yazd, and Kerman are provinces that face the worst conditions and had the least values for water security index (all below 0.22). Mazandaran province with water security index of 0.416 was ranked first mostly due to good condition in resource dimension. East Azerbaijan province due to balance and relatively good status in all dimensions was ranked second. Hormozgan province with water security index of 0.386, because of the best condition in economic dimension was ranked 3rd.

Keywords: Composite Indicators, Geometric Aggregation, Indicator Normalization, Security of Access to Water, Water Security.

* نویسنده مسئول
Email: bzahraie@ut.ac.ir

مقدمه

امنیت آبی به‌عنوان مفهومی جامع که سنجش میزان دستیابی به اهداف مختلف مدیریت منابع آب را در بر می‌گیرد، در بحث‌های جهانی ظهور کرده است و جذابیت فزاینده‌ای برای دولت‌ها، مشاغل و سازمان‌های غیر دولتی پیدا کرده است (Mason & Calow, 2012). جهان دارای امنیت آبی از قدرت مولد آب استفاده می‌کند و قدرت مخرب آن را به حداقل می‌رساند. در این شرایط، همه افراد به آب کافی، پایدار و با کیفیت مناسب دسترسی دارند؛ جوامع از سیل، خشک‌سالی، نشست زمین و دیگر بحران‌های آبی در امان هستند و حفاظت از محیط زیست ترویج داده می‌شود (GWP, 2014a). در گزارش سازمان ملل، امنیت آبی به این صورت تعریف می‌شود: «امنیت آب، ظرفیت یک جامعه برای حفاظت از دسترسی پایدار به مقادیر کافی از آب با کیفیت قابل‌قبول به‌منظور حفاظت از معیشت، رفاه انسان و توسعه اجتماعی- اقتصادی است. امنیت آبی هم‌چنین به معنای اطمینان از محافظت در برابر بحران‌های آبی، آلودگی آب و حفظ اکوسیستم در شرایط صلح و ثبات سیاسی است» (UN 2013).

امنیت آبی در ایران به دلایل مختلفی در معرض تهدید قرار دارد. کشور ایران با سرانه آب تجدیدپذیر در حدود ۱۷۰۰ مترمکعب در سال، منابع آب در دسترس کم‌تری از میانگین جهانی دارد و این منابع نیز به‌طور کاملاً غیریکنواخت بین نواحی مختلف ایران تقسیم شده‌اند. رشد جمعیت و افزایش نرخ شهرنشینی از یک سو و گسترش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی به‌منظور رسیدن به خودکفایی غذایی از سوی دیگر، نیروهای محرکه‌ای هستند که منجر به واردشدن تنش بر همین منابع محدود شده‌اند. تنش‌های وارد شده منجر به افت بسیار شدید سطح آبخوان‌ها، خشک‌شدن تالاب‌ها و دریاچه‌ها و آلودگی پهنه‌های آبی شده است (Moridi, 2017). به‌علاوه، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که روند تغییر اقلیم به‌طور کلی به سمت کاهش بارش و افزایش دما به‌ویژه در فصول گرم‌تر سال است که می‌تواند وضعیت منابع آب را حتی بدتر از حالت فعلی کند (Ghiami-shamami & Sabziparvar, 2018; Daneshvar *et al*., 2019). در این شرایط، یافتن راه حلی که بتواند وضعیت منابع آب را بهبود دهد و در عین‌حال کم‌ترین آسیب را به سیستم‌های دیگری چون تولید غذا، تولید انرژی و اقتصاد برساند، بسیار دشوار است و نیاز به نگرشی جامع به مدیریت منابع آب وجود دارد. امنیت آبی می‌تواند ابزاری در اختیار سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران قرار دهد تا اولاً شرایط فعلی منابع آب را به شکلی جامع ارزیابی کنند و ثانیاً با پایش مداوم امنیت آبی، از میزان اثرگذاری تصمیم‌های مدیریتی در کوتاه‌مدت و بلندمدت، آگاه شوند.

رویکرد اصلی در ارزیابی امنیت آبی، استفاده از شاخص‌های ترکیبی است و سازمان مشارکت جهانی آب[1] (GWP) چارچوب کلی توسعه این شاخص‌ها را ارائه کرده است. در این چارچوب ابتدا باید اهداف کلان ارزیابی امنیت آبی تعیین شوند. در مرحله بعد ابعاد کلیدی امنیت آبی براساس اهداف کلان تعریف می‌شوند و در نهایت به‌منظور کمی‌سازی ابعاد کلیدی، شاخص‌های متناسب تعریف می‌شوند (GWP, 2014b). ارزیابی وضعیت منابع آب و دیگر جنبه‌های اثرگذار بر آن با استفاده از شاخص‌ها، سابقه‌ای طولانی دارد. یکی از قدیمی‌ترین و پراستفاده‌ترین این شاخص‌ها، شاخص تنش آبی فالکنمارک است (Falkenmark, 1989). پس از آن Raskin *et al*. (1996) به‌منظور تعریف شاخص مناسب‌تری که میزان تنش منابع آبی را نشان دهد، شاخص نسبت برداشت به موجودی[2] (WTA) را توسعه دادند. اولین شاخص ترکیبی[3] که علاوه بر وضعیت منابع، بحث‌های محیط‌زیستی، مدیریتی و اجتماعی را در ارزیابی وارد می‌کند، شاخص فقر آبی است که Sullivan (2002) آن را توسعه داده است.

مجمع جهانی آب[4] که در سال ۲۰۰۰ و به‌منظور تعیین اهداف کلان مدیریت منابع آب برگزار شد را می‌توان یکی از نقاط عطف در گسترش رویکرد امنیت آبی دانست چرا که در آن امنیت آبی محور اصلی گفت‌وگوها و بیانیه نهایی مجمع بود (WWC, 2000). یکی از تلاش‌های ابتدایی برای ارزیابی امنیت آبی، در سال ۲۰۰۷ و به‌منظور ارزیابی امنیت آبی حوزه‌های آبخیز منطقه هگزی کریدور کشور چین، صورت گرفته است (Xiao *et al.*, 2008). در این پژوهش شاخص ترکیبی امنیت آبی با چهار بعد تضاد بین عرضه و تقاضای آب، محیط زیست اکولوژیک، امنیت غذایی و ظرفیت کنترل بحران توسعه داده شده است و پس از ارزیابی حوزه‌های ذکرشده، پیشنهاداتی برای بهبود وضعیت امنیت آبی در این منطقه ارائه شده است. در نهایت پیشنهاد شده است که مدل توسعه داده‌شده برای پشتیبانی از تصمیم‌های مدیریتی استفاده شود تا از بحران‌های آبی، قبل از وقوع جلوگیری شود. بسیاری از پژوهش‌ها به ارزیابی امنیت آبی در مناطق شهری که به‌دلیل تمرکز جمعیتی، پیچیدگی‌های خاص خود را دارند، پرداخته‌اند و تلاش کرده‌اند تا شاخص‌های ترکیبی متناسب با این مناطق توسعه دهند (Jensen & Wu, 2018; Ray & Shaw, 2019; Krueger *et al.*, 2019). جامع‌ترین شاخص امنیت آبی توسط بانک توسعه آسیا[5] (ADB) تدوین شده است. کشورهای شرق آسیا و آسیای میانه با استفاده از این شاخص در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰ ارزیابی شده‌اند. این شاخص ترکیبی از پنج بعد کلیدی امنیت آبی روستایی، امنیت آبی شهری، امنیت آبی اقتصادی، امنیت آبی محیط زیستی و تاب‌آوری در برابر بحران‌های آبی تشکیل شده است. از نتایج این پژوهش برای تحلیل نقاط ضعف و قوت کشورهای این منطقه در مدیریت منابع آب استفاده شده است و به‌دلیل پایش مداوم آن، روند تغییر وضعیت این کشورها پایش می‌شود (ADB, 2020).

به مبحث ارزیابی امنیت آبی، کم‌تر در مطالعات داخلی توجه شده است. Taheri Rikande (2016) به‌منظور ارزیابی اثرات سیاست‌های خودکفایی غذایی بر امنیت آبی، از شاخص فقر آبی برای ارزیابی امنیت آبی استفاده کرده است و به این نتیجه رسیده است که استان‌های سیستان و بلوچستان، قم، کرمان و هرمزگان در شرایط ناامنی آبی به سر می‌برند. Zekri (2017) شاخص امنیت آبی در مقیاس حوضه آبریز را با استفاده از شاخص‌های مورداستفاده وزارت نیرو، توسعه داد و حوضه‌های آبریز درجه یک و دو کشور را براساس آن ارزیابی کرد که براساس این ارزیابی حوضه‌های آبریز هامون- هیرمند، قره‌قوم، سیاه‌کوه و ارس بدترین شرایط را از منظر امنیت آبی دارند. Ansari *et al.* (2019) با شبیه‌سازی تغییرات اقلیم حوضه آبریز طشک بختگان تحت سناریوهای مختلف مدیریتی در دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰، شاخص‌های امنیت آبی را در دوره پایه و دوره آتی برای این حوضه محاسبه کردند و به این نتیجه رسیدند که توسعه کشاورزی خسارات شدیدی به منابع آب زیرزمینی وارد کرده است و باید با اعمال محدودیت برداشت آب، این مسأله کنترل شود.

با توجه به این مسأله که سیاست‌گذاری و اجرای سیاست‌های اقتصادی، اجتماعی و به‌ویژه مدیریت منابع آب در سطح استانی انجام می‌شود، لازم است تا ارزیابی‌های انجام‌گرفته نیز در سطح استانی باشد. پژوهش حاضر با توجه به این مسأله، سعی در ارائه چارچوبی برای ارزیابی امنیت آبی در سطح استانی دارد. این پژوهش، در ابتدا شاخص‌های مناسب برای کمی‌سازی امنیت آبی در سطح استانی ارائه می‌کند و در مرحله بعد، روش‌شناسی متناسب برای تجمیع شاخص‌های ارائه شده، پیشنهاد می‌دهد. در نهایت با استفاده از چارچوب توسعه داده شده، امنیت آبی استان‌های ایران ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

شاخص ترکیبی، همان‌طور که از نام‌گذاری آن مشخص است، شاخصی است که از حاصل تجمیع تعدادی زیرشاخص تشکیل شده است. توسعه شاخص‌های ترکیبی فرایندی چند مرحله‌ای است که در هر مرحله باید با توجه به مفهوم مورد ارزیابی و شرایط خاص منطقه مورد ارزیابی، روش مناسب انتخاب شود. مهم‌ترین مرحله‌های این فرایند، در ادامه تشریح شده‌اند.

به‌منظور توسعه شاخص ترکیبی امنیت آبی، ابتدا باید ابعاد کلیدی مفهوم امنیت آبی تعریف شوند. در مرحله بعد شاخص‌های مرتبط با هر بعد کلیدی براساس شاخص‌های استفاده‌شده در پژوهش‌های قبلی انتخاب شوند و شاخص‌های جدیدی مطابق شرایط خاص مسأله تعریف شوند. پس از نهایی‌شدن شاخص‌های تشکیل‌دهنده هر کدام از ابعاد، باید شاخص‌ها را که عموماً واحد و مقیاس متفاوتی دارند، بی‌بُعد نمود و مقادیر آن‌ها را به بازه یکسانی منتقل کرد. پس از یکسان‌سازی مقیاس، شاخص‌ها وزن‌دهی می‌شوند تا اهمیت آن‌ها نسبت به یکدیگر تعیین شود. در نهایت باید روش تجمیع مناسب شاخص‌ها تعیین شود تا بتوان مقدار شاخص امنیت آبی را محاسبه و رتبه‌بندی گزینه‌ها را تعیین کرد (Nardo *et al.*, 2005). در ادامه، جزئیات بیش‌تری از هر یک از این مراحل تشریح شده است.

انتخاب ابعاد کلیدی امنیت آبی

در جدول (۱) ابعاد کلیدی که در مطالعات شاخص قبلی برای امنیت آبی در نظر گرفته شده‌اند، ارائه شده است. با در نظرگرفتن ابعاد جدول (۱) و تعاریف ارائه‌شده از امنیت آبی، در این پژوهش پنج بُعد کلیدی برای شاخص امنیت آبی استانی در نظر گرفته شده است.

– امنیت منابع آب: این بعد وضعیت منابع آب قابل استفاده در هر استان و ناپایداری‌های منابع سطحی و زیرزمینی را ارزیابی می‌کند. از این بعد کلیدی در ادامه مقاله به اختصار، به‌عنوان بعد منابع نام برده می‌شود.

– امنیت دسترسی به خدمات آب و فاضلاب: این بعد کلیدی سطح دسترسی مردم استان به زیرساخت‌های آب و فاضلاب و هم‌چنین پایداری دسترسی به خدمات این زیرساخت‌ها را ارزیابی می‌کند. از این بعد کلیدی به اختصار به‌عنوان بعد دسترسی نام برده می‌شود.

– امنیت آبی از منظر اقتصادی: این بعد میزان ارزش اقتصادی تولیدشده با استفاده از آب و هم‌چنین بهینه‌بودن استفاده از آن را ارزیابی می‌کند. در این بعد می‌توان اثر کمبود آب بر اشتغال را نیز بررسی کرد. از این بعد کلیدی به اختصار به‌عنوان بعد اقتصاد نام برده می‌شود.

– امنیت آبی از منظر محیط‌زیستی: این بعد سلامت محیط‌زیست طبیعی را از منظر کمی و کیفی ارزیابی می‌کند. میزان تغییر رژیم جریان رودخانه‌ها در مقایسه با حالت طبیعی و هم‌چنین میزان آلودگی آن‌ها از مسائلی اصلی مورد بررسی این بعد است.

– شرایط حدی: این بعد تاب‌آوری یا آسیب‌پذیری مردم و اقتصاد را در برابر شرایط حدی از جمله سیل و خشک‌سالی ارزیابی می‌کند. میزان خسارت اقتصادی سالانه و تلفات جانی ناشی از شرایط حدی، مساحت درگیر با بحران و میزان ذخیره سدها (به‌عنوان کاهش‌دهنده آسیب‌پذیری در برابر سیل یا خشک‌سالی) از شاخص‌های اصلی مورد استفاده در این بعد هستند.

نحوه انتخاب شاخص‌ها

انتخاب شاخص‌های مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های مختلف به روش‌های متفاوتی انجام می‌شود. پرکاربردترین این روش‌ها، رویکرد بالا به پایین[۶] و رویکرد پایین به بالا[۷] هستند.

Table 1. Key dimensions considered for water security in different references

Reference	Water Security Dimensions	
Xiao *et al*. (2008)	1- Conflict between water supply and demand 2- Ecological environment	3- Food security 4- Disaster management capacity
Lautze and Manthrithilake (2012)	1- Basic household needs 2- Food production 3- Environmental flows	4- Risk management 5- Independence
ADB (2016)	1- Household water security 2- Economic water security 3- Urban water security	4- Environmental water security 5- Resilience to water-related disasters
Zekri (2017)	1- Security of resources & consumption 2- Environmental water security 3- Social water security	4- Economic water security 5- Water security disaster 6- Water independence
Jensen & Wu (2018)	1- Resources 2- Access	3- Risks 4- Governance
Ray & Shaw (2019)	1- Physical 2- Socio-economic	3- Institutional

در رویکرد بالا به پایین ابتدا هدف ارزیابی تعیین می‌شود و سپس با استفاده از مقاله‌ها، استانداردها و گزارش‌های سازمان‌های مرتبط، شاخص‌های مناسب شناسایی می‌شوند و در نهایت از بین شاخص‌های شناسایی‌شده، شاخص‌های مناسب انتخاب می‌شوند (Puig *et al*., 2014). در پژوهش حاضر هم، رویکرد بالا به پایین مبنای انتخاب شاخص‌ها قرار گرفته است. با استفاده از این رویکرد و مقایسه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه شاخص‌های استفاده‌شده در مراجع و اطلاعات در دسترس، شاخص‌های نهایی مطابق جدول‌های (۲) تا (٤) انتخاب شدند. به‌دلیل در دسترس‌نبودن هیچ کدام از اطلاعات اساسی موردنیاز برای محاسبه شاخص‌های دو بعد امنیت آبی از منظر محیط‌زیستی و شرایط حدی، با وجود اهمیت بسیار زیاد این ابعاد، از ارزیابی کنار گذاشته شدند. هم‌چنین لازم به ذکر است که داده‌های استفاده‌شده برای محاسبه شاخص امنیت آب، مربوط به سال‌های مختلفی است. رویکرد پژوهش حاضر به این مسأله، استفاده از جدیدترین داده‌های در دسترس است. گاهی جدیدترین داده‌های موجود برای محاسبه متغیرهای یک شاخص، مربوط به سال‌های متفاوتی است؛ در این موارد، در صورتی‌که متغیرها برای سال یکسانی قابل محاسبه بودند، آن سال مبنای محاسبه قرار گرفته است.

برای انتخاب شاخص‌های مناسب برای هر کدام از ابعاد کلیدی امنیت آبی، سه ویژگی اصلی در نظر گرفته شده است؛ مرتبط‌بودن شاخص با ابعاد امنیت آبی و میزان اهمیت آن در بعد مربوطه، وجود داده‌های معتبر برای محاسبه شاخص‌ها (ترجیحاً استفاده از داده‌های در دسترس و غیرمحرمانه که کاربرد شاخص را در آینده محدود کند)، قابل مقایسه‌بودن شاخص‌ها بدین معنی که تعریف شاخص‌ها به گونه‌ای باشد که مقادیر آن‌ها وابسته به پارامترهایی مثل جمعیت و مساحت نباشد. در جدول (۲) شاخص‌های بعد منابع، در جدول (۳) شاخص‌های بعد دسترسی و در جدول (٤) شاخص‌های بعد اقتصاد آمده است. شاخص‌هایی که در این جدول‌ها مرجعی برای آن‌ها ذکر نشده، شاخص‌هایی هستند که براساس داده‌های در دسترس و مفهوم امنیت آبی توسط مؤلفین پیشنهاد شده‌اند. در شاخص‌های بعد منابع، تأکید ویژه‌ای بر شاخص‌های مربوط به منابع آب زیرزمینی وجود دارد که به‌دلیل دلیل اهمیت بالای این موضوع برای کشور ایران است که با مشکلات عمده‌ای در این زمینه درگیر است.

Table 2. Indicators, sub-indicators, references for the indicators for the "Resources" dimension and the sources of the data used for their calculation

Indicator	Sub-indicator	Variable	Data source°	Year	References*
Predicted IRWR	Per capita IRWR	Population	I	2016	A, B, D, E,
	(Internal renewable water resources)	Internal renewable water resources	II	2011	F
	Population change ratio	5-year population growth rate	I	2016	-
Climate	Inter-annual coefficient of variation	Average annual precipitation time series	III	2019	B, C
	Monthly coefficient of variation	Average monthly precipitation time series	III	2019	
	Precipitation anomaly	Average annual precipitation time series	III	2019	C
	Temperature anomaly	Average annual temperature time series	III	2019	
Water stress	Surface water stress	Internal renewable surface water resources	II	2011	C, E
		Annual surface water withdrawal	II	2011	
	Groundwater stress	Internal renewable groundwater resources	II	2011	
		Annual groundwater withdrawal	II	2011	
Dependence on groundwater resources	Dependence of agriculture on groundwater resources	Agricultural groundwater withdrawal	II	2011	E
		Total agricultural water withdrawal	II	2011	
	Dependence of urban drinking water on groundwater	Urban groundwater withdrawal	IV	2018	
		Total water produced for urban use	IV	2018	
	Dependence of rural drinking water on groundwater	Rural groundwater withdrawal	IV	2018	
		Total water produced for rural use	IV	2018	
	Dependence of industry on groundwater resources	Industrial groundwater withdrawal	II	2011	
		Total industrial water withdrawal	II	2011	
Aquifers' deficit	Annual deficit of aquifers	Average annual groundwater reservoir deficit	II	2018	G
		Total annual groundwater withdrawal	II	2011	
	Cumulative deficit of aquifers	Cumulative groundwater reservoir deficit	II	2018	F
		Internal renewable groundwater resources	II	2011	

*** A: Xiao *et al.* 2008, B: Lautze && Manthrithilake, 2012, C: ADB, 2016; D: Jensen & Wu, 2018, E: Zekri, 2017, F: Ray & Shaw 2018, G: Gain *et al.*, 2016.**
° I: Census data, II: Iran water resources management company, III: Iran meteorological organization, IV: Water & wastewater statistical yearbook.

Table 3. Indicators, sub-indicators, references for the indicators in the "Access" dimension and sources of data used for their calculation

Indicator	Sub-indicator	Variable	Data source°	Year	References*
Drinking Water Quality	Ratio of urban population that treat water domestically	Number of urban households that use inhouse water treatment packages	I	2016	C, F
		Total number of urban households	II	2016	
Quantity & Quality of Access to Drinking water	Urban access to piped water	Urban access to piped treated water	III	2018	B, C, D, F, G
	Rural access to clean water	Rural access to clean water	III	2018	
	Ratio of population under water stress	Population under water stress	IV	2020	-
		Total population under coverage	IV	2020	
State of Sanitation Services	Urban access to sanitation services	Urban access to sanitation services	III	2018	C, D, G
	Rural access to sanitation services	Rural access to sanitation services	III	2018	
		Total access to sanitation services	III	2018	
	Wastewater treatment plants' coverage	Total wastewater collected	V	2018	F
		Operational capacity of wastewater treatment plants	III	2018	
State of Dams	Operational capacity of dams to renewable surface water ratio	Total volume of operational dams	VI	2020	B, C, D
		Renewable surface water resources	VI	2011	

*** A: Xiao *et al.*, 2008, B: Lautze & Manthrithilake, 2012, C: ADB, 2016, D: Jensen & Wu, 2018, E: Zekri, 2017, F: Ray & Shaw, 2018, G: Gain *et al.*, 2016.**
° I: Urban environmental characteristics survey, II: Census data, III: Water & wastewater statistical yearbook, IV: Water and Wastewater Company of Iran, V: Environmental statistical yearbook, VI: Iran water resources management company.

Table 4. Indicators, sub-indicators, references for the indicators in the "Economy" dimension and sources of used for their calculation

Indicator	Sub-indicator	Variable	Data source°	Year	References*
Agricultural productivity	Agricultural productivity	Agricultural added value	I	2011	C, E
		Agricultural water withdrawal	II	2011	
Modern irrigation	Ratio of irrigated land using modern irrigation	Area of irrigated land using modern irrigation	III	2018	-
		Total area of irrigated land	III	2018	
Employment under threat	Employment under threat due to groundwater reservoir deficit	Agricultural emplyment	IV	2017	E
		Internal renewable water resource per capita	II	2011	
Industrial productivity	Industrial productivity	Industrial added value	I	2011	C, E
		Industrial water withdrawal	II	2011	
Non-revenue water	Urban non-revenue water	Urban non-revenue water	V	2018	E, F
	Rural non-revenue water	Rural non-revenue water	V	2018	

*** A: Xiao *et al.* 2008, B: Lautze & Manthrithilake, 2012, C: ADB, 2016, D: Jensen & Wu, 2018, E: Zekri, 2017, F: Ray & Shaw, 2018, G: Gain *et al.*, 2016.**
° I: Detailed report on GDP by statistical centre of Iran, II: Iran water resources management company, III: Agriculture, forestry and fisheries statistical yearbook, IV: Employment survey by statistical centre of Iran, V: Water & wastewater statistical yearbook.

یکسان‌سازی مقیاس[8]

روش بیشینه–کمینه[9] با استفاده از مقادیر کمینه و بیشینه داده‌ها، مقادیر آن‌ها را به بازه صفر تا یک تغییر مقیاس می‌دهد. مقادیر داده‌های نرمال‌شده با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند. اگر مقدار یک را برای شاخص تغییر مقیاس‌یافته، مطلوب و مقدار صفر را نامطلوب بدانیم، با استفاده از رابطه (۱) شاخص‌های از نوع «هرچه بیش‌تر بهتر» و با استفاده از رابطه (۲) شاخص‌های از نوع «هرچه کم‌تر بهتر» تغییر مقیاس داده می‌شوند. این روش بسیار پرکاربرد است و در یکسان‌سازی مقیاس شاخص‌های امنیت آبی نیز کاربرد زیادی داشته است (Yang *et al*., 2012; Xiao *et al*., 2008):

$$x_{new} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۱)$$

$$x_{new} = \frac{x_{max} - x}{x_{max} - x_{min}} \quad (۲)$$

در این رابطه، x مقدار داده‌ای است که تغییر مقیاس‌یافتن آن مطلوب است، x_{min} و x_{max} نیز به‌ترتیب برابر با مقادیر بیشینه و کمینه داده‌ها هستند. در این پژوهش از روش کمینه– بیشینه استفاده شده است، با این تفاوت که به جای مقادیر کمینه و بیشینه، از حدود مطلوب و نامطلوب استفاده شده است که نحوه اعمال این حدود در ادامه بیان می‌شود.

شاخص‌ها را از نظر نحوه ارتباط با شاخص ترکیبی می‌توان به سه گروه دسته‌بندی کرد: ۱– شاخص‌های از نوع «هرچه بیش‌تر، بهتر»، ۲– شاخص‌های از نوع «هر چه کم‌تر، بهتر» و ۳– شاخص‌های از نوع «هرچه نزدیک‌تر به نقطه مرجع، بهتر». در نوع آخر، با افزایش یا کاهش مقدار شاخص به نسبت حالت مطلوب، مقدار شاخص تغییر مقیاس‌یافته نیز کاهش می‌یابد (Liu, 2014). در شکل (۱)، نحوه یکسان‌سازی مقیاس شاخص‌ها با استفاده از روش توسعه داده‌شده، نمایش داده شده است. در شکل (a–۱) که مربوط به شاخص‌های «هرچه بیش‌تر، بهتر» است، وقتی مقدار شاخص بیش‌تر/ کم‌تر از حد مطلوب/ نامطلوب باشد، مقدار تغییر مقیاس‌یافته آن برابر با یک/ صفر در نظر گرفته می‌شود و در فاصله بین این حدود، شاخص‌ها به‌صورت خطی بین صفر و یک تغییر مقیاس می‌یابند. شکل (b–۱) نیز نشان می‌دهد که عکس این حالت برای شاخص‌های «هرچه کم‌تر، بهتر» برقرار است. شکل (c–۱) تغییر مقیاس شاخص‌های از نوع «هرچه نزدیک‌تر به مقدار مطلوب، بهتر» را نشان می‌دهد. مقدار تغییر مقیاس‌یافته این نوع از شاخص‌ها در شرایطی که مقدار اولیه آن‌ها برابر با کمینه یا بیشینه باشد، برابر صفر می‌شود. با نزدیک‌شدن مقادیر اولیه شاخص به مقدار مطلوب، مقدار تغییر مقیاس‌یافته نیز افزایش می‌یابد و در نهایت در نقطه مطلوب برابر با یک می‌شود. برای پیاده‌سازی روش ذکرشده، ابتدا لازم است مقادیر مطلوب و نامطلوب برای همه شاخص‌ها تعریف شود تا بتوان با استفاده از آن‌ها، مقیاس شاخص‌ها را یکسان کرد. تعیین حدود مطلوب و نامطلوب برای هر شاخص، با استفاده از سه منبع انجام شده است:

– مقادیر مطلوب یا نامطلوب ذکرشده برای شاخص‌ها در مراجع

– استفاده از مقادیر محاسبه‌شده برای شاخص‌ها برای کشورهای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا[10] (MENA)

– بیشینه و کمینه خود داده‌ها پس از حذف داده‌های پرت

وزن‌دهی و تجمیع

استفاده از وزن‌های مساوی در شاخص‌های ترکیبی بسیار متداول است. شاخص‌های ترکیبی پرکاربردی هم‌چون شاخص توسعه انسانی[11] (HDI) و شاخص دستاوردهای فناوری[12] (TAI) که سازمان ملل آن‌ها را توسعه داده است، از وزن‌های مساوی استفاده می‌کنند (Desai *et al*., 2002; UNDP, 2010). از این روش به‌منظور کاهش پیچیدگی در تعریف شاخص استفاده می‌شود.

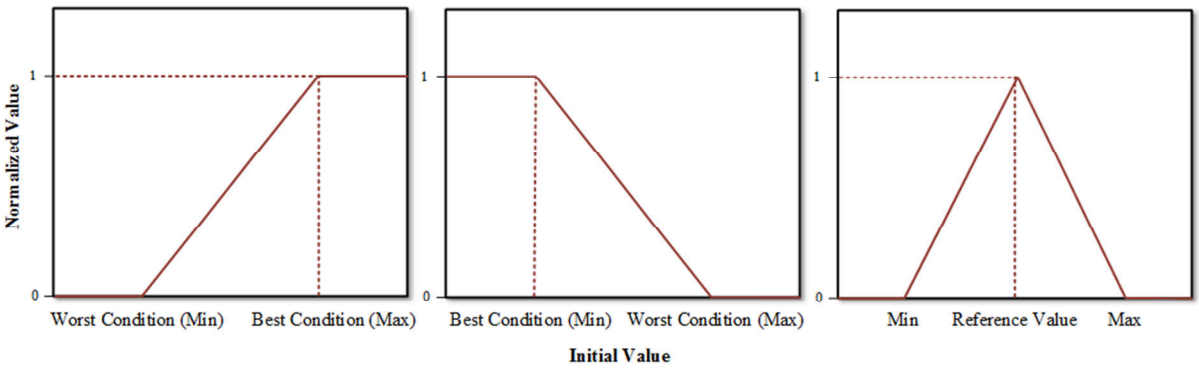

Figure 1. Proposed normalization method for water security indicators

روش تجمیع شاخص‌ها را می‌توان مهم‌ترین مرحله در توسعه شاخص‌های ترکیبی در نظر گرفت. Zhou & Ang (2009) عدم قطعیت روش‌های یکسان‌سازی مقیاس، وزن‌دهی، تجمیع و انتخاب شاخص‌ها را تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که روش تجمیع، عامل بیش‌ترین مقدار عدم قطعیت موجود در شاخص‌های ترکیبی است. یکی از مسائل اساسی در انتخاب روش تجمیع مناسب، جبران‌کنندگی[۱۳] آن‌هاست. در شاخص‌های تجمیع‌شده با استفاده از روش‌های جبرانی، عملکرد خوب در یک زیرشاخص می‌تواند عملکرد بد در زیرشاخص‌های دیگر را جبران کند (Munda, 2016). عموم شاخص‌های ترکیبی از روش میانگین حسابی که یک روش جبرانی است، استفاده می‌کنند (ADB, 2016; Ray & Shaw, 2019; Desai *et al.*, 2002). روش‌های کاملاً جبرانی مورد انتقاد متخصصین قرار دارند، چرا که اولاً در بیش‌تر موارد، شاخص‌های مورد ارزیابی از نظر مفهومی نمی‌توانند عملکرد یکدیگر را جبران کنند و شرایط مناسب سیستم منوط به عملکرد مناسب همه اجزای آن است. ثانیاً استفاده از روش‌های غیرجبرانی (یا نیمه‌جبرانی[۱۴])، تصمیم‌گیران را تشویق می‌کند که به بخش‌هایی از سیستم که شاخص مربوط به آن‌ها عملکرد مناسبی ندارند، توجه بیش‌تری کنند چرا که بهبود عملکرد آن اجزا اثر بیش‌تری در بهبود عملکرد شاخص ترکیبی خواهد داشت (Munda & Nardo, 2005).

با توجه به توضیحات ذکرشده، در این پژوهش برای تجمیع شاخص‌های امنیت آبی استانی در سطوح تجمیع مختلف از روش تجمیع هندسی (میانگین هندسی) که روشی نیمه‌جبرانی است، استفاده شده است (رابطه ۳). در محاسبه شاخص توسعه انسانی (HDI) نیز که ابتدا با استفاده از روش میانگین حسابی تجمیع می‌شد، از سال ۲۰۱۰ میلادی به بعد، از روش میانگین هندسی استفاده می‌شود (UNDP, 2010).

$$CI_p = \prod_{i=1}^{n} {I_{pi}}^{w_i} \qquad (۳)$$

$$\sum w_i = 1, 0 \le w_i \le 1$$

در این رابطه، CI شاخص ترکیبی، I زیرشاخص تشکیل‌دهنده شاخص ترکیبی، w وزن هر شاخص در سطح تجمیع مورد نظر، p اندیس مربوط به استان و i اندیس مربوط به زیرشاخص‌هاست.

یکی از مشکلات روش میانگین هندسی، حساس‌بودن این روش به مقادیر صفر و نزدیک صفر است. در شرایطی که یکی از شاخص‌های مورد تجمیع مقداری نزدیک صفر داشته باشد، حاصل تجمیع به شکلی غیرمنطقی تحت تأثیر

مقدار آن شاخص قرار می‌گیرد (در صورت صفربودن، حاصل تجمیع برابر با صفر می‌شود)، به همین دلیل در شرایطی که مقدار شاخصی، در اثرتغییر مقیاس یافتن، نزدیک به صفر شده است، مقدار ۰/۰۱ جایگزین شده است.

وابستگی‌های مفهومی شاخص‌ها

با بررسی شاخص‌ها مشخص می‌شود که برخی شاخص‌ها اثرات متقابلی بر هم دارند که نمی‌توان این اثرات را با استفاده از روش تجمیع در نظر گرفت. این اندرکنش‌ها و روشی که این اثرات در ارزیابی امنیت آبی در نظر گرفته شداند، در ادامه تشریح می‌شود. شاخص «وضعیت سدها» تنها شاخص از نوع «هر چه نزدیک‌تر به مقدار مطلوب، بهتر» است. براساس روش تنانت[۱۵] برای میزان حقابه محیط زیستی، اگر ۳۰ درصد جریان طبیعی رودخانه‌ها به‌عنوان حقابه محیط زیستی در نظر گرفته شود، محیط زیست رودخانه شرایط مناسبی خواهد داشت (Tennant, 1976). بنابراین در این پژوهش، حد مطلوب حجم ذخیره سدها برابر با ۷۰ درصد آب تجدیدپذیر سطحی هر استان در نظر گرفته شده است. از طرفی هرچه زیرشاخص‌های ضریب تغییرات بارش ماهانه و سالانه بیش‌تر باشند به این معنی است که منابع آب تجدیدپذیر تولیدشده در داخل استان، در طول سال‌ها و ماه‌های مختلف، تغییرات زیادی خواهد داشت و بنابراین حجم ذخیره بیش‌تر سدها، مطلوب است. بنابراین حد مطلوب این شاخص برای استان‌های مختلف، با توجه به میانگین ضریب تغییرات بارش ماهانه و سالانه استان متغیر است. در این پژوهش، بازه تغییرات میانگین ضریب تغییرات بارش ماهانه وسالانه استان‌ها به چهار دسته با طول مساوی تقسیم شده است و براساس آن، مبنای حد مطلوب میزان ذخیره سدها به نسبت آب تجدیدپذیر سطحی هر استان در بازه ۷۰ درصد تا ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است.

میزان وابستگی به آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف، شاخصی از نوع «هرچه کم‌تر، بهتر» در نظر گرفته شده است، اما این فرض همواره درست نیست. وابستگی به آب زیرزمینی در شرایطی امنیت آبی که میزان برداشت آب از منابع زیرزمینی، بیش از حد تجدیدپذیر این منابع باشد و یا به‌دلیل برداشت بیش از حد این منابع به‌مدت طولانی، کسری تجمعی قابل‌توجهی در مخازن ایجاد شده باشد، منجر به کاهش امنیت آبی می‌شود. به همین دلیل، شاخص وابستگی به آب زیرزمینی در شرایطی که شاخص وضعیت مخازن آب زیرزمینی در حالت مطلوب قرار دارد، در تجمیع شاخص‌های بعد منابع مشارکت نمی‌کند.

Scott *et al.* (2014) در پژوهشی با بررسی سه حوضه آبریز در شیلی، ایالات متحده و اسپانیا، به برخی تناقض‌های ایجادشده در زمینه مدیریت منابع آب پرداخته‌اند. یکی از این تناقض‌ها، «تناقض بهره‌وری» معرفی شده است که به مسأله تخلیه بیش از حد منابع به‌دلیل افزایش بهره‌وری آبیاری می‌پردازد. بررسی‌های این پژوهش مشخص کرد که افزایش بهره‌وری به‌واسطه تغییر سیستم‌های آبیاری سنتی به مدرن، به‌جای کاهش برداشت آب، منجر به افزایش سطح زیر کشت یا تغییر الگوی کشت به سمت محصولات با نیاز آبی بالا می‌شود. برای مثال در حوضه لیماری[۱۶] واقع در کشور شیلی، به‌دلیل ساخت سدها و افزایش ۶۰ درصدی زمین‌های آبیاری شده به‌روش آبیاری قطره‌ای، سطح زیر کشت در طول ۳۰ سال، ۱/۵ برابر شده است و هم‌زمان الگوی کشت از غلات به باغ‌های میوه تغییر کرده است. این مسأله در نهایت به‌دلیل کاهش آب برگشتی کشاورزی به سفره‌های زیرزمینی منجر به کسری بیش‌تر این منابع می‌شود. به‌منظور در نظرگرفتن این مسأله در ارزیابی امنیت آبی، مقدار تغییر مقیاس داده شده شاخص آبیاری نوین، بسته

به مقدار شاخص وضعیت مخزن آب زیرزمینی، اصلاح می‌شود. به این منظور، بازه تغییرات مقدار شاخص کسری مخزن در استان‌های مختلف به چهار دسته تقسیم شده است و بسته به قرارداشتن مقدار این شاخص در هر کدام از این دسته‌ها، شاخص آبیاری نوین با ضریب کاهنده‌ای (بین ۰/۷ تا ۰/۹)، اصلاح شده است.

نتایج و بحث

پس از انتخاب شاخص‌ها و یکسان‌سازی مقیاس آن‌ها، باید با استفاده از روش تجمیع هندسی و هم‌چنین در نظرگرفتن وابستگی‌های مفهومی شاخص‌ها، ابتدا مقدار هر کدام از ابعاد کلیدی امنیت آبی و سپس با تجمیع آن‌ها، شاخص امنیت آبی استانی محاسبه شود. جدول (۵) و شکل‌های (۲) تا (۵) نتایج این ارزیابی‌ها را نمایش می‌دهند. مقادیر محاسبه‌شده برای ابعاد بین صفر و یک است و صفر به معنای بدترین وضعیت و یک به معنای بهترین وضعیت است. رنگ‌بندی استان‌ها به‌صورت قرمز پر رنگ برای بدترین وضعیت ابعاد و سبز پر رنگ برای بهترین وضعیت در نظر گرفته شده است. به‌علاوه، سعی شده است که نقشه‌های پهنه‌بندی ابعاد و شاخص‌های استان‌ها در محدوده تغییرات خود به پنج رنگ مختلف دسته‌بندی شوند تا تفاوت مقادیر ابعاد بین استان‌ها، قابل مشاهده باشد.

شکل (٤) نتایج ارزیابی بعد منابع را نمایش می‌دهد. در این بعد، استان‌های واقع در بالادست حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان و استان‌های واقع در حاشیه دریای خزر (به‌جز گلستان) بهترین وضعیت را دارند. گیلان، لرستان، مازندران، کردستان و ایلام به‌ترتیب رتبه‌های یک تا پنج (بهترین وضعیت) را به خود اختصاص داده‌اند. برای همه این استان‌ها شاخص «سرانه آب تجدیدپذیر پیش‌بینی‌شده»، بیش از ۱۷۰۰ مترمکعب است که حد مطلوب در نظر گرفته‌شده برای این شاخص است. در ضمن شاخص «وضعیت مخزن آب زیرزمینی» نیز برای همه این استان‌ها در وضعیت بسیار مناسبی (مقادیر بیش از ۰/۹) قرار دارد. استان‌های واقع در مرز شرقی و استان‌های شرقی متمایل به مرکز که در محدوده سه حوضه آبریز قره‌قوم، مرزی شرق و فلات مرکزی قرار دارند (به‌علاوه استان بوشهر)، بدترین وضعیت را دارند. استان‌های خراسان رضوی، یزد، سمنان، قم و تهران به‌ترتیب رتبه‌های ۲۷ تا ۳۱ را در این بعد از امنیت آبی به خود اختصاص داده‌اند. استان تهران به‌دلیل جمعیت بالا سرانه تجدیدپذیر بسیار کمی دارد (کم‌ترین در کل استان‌ها)، هم‌چنین تنش وارد بر منابع سطحی و زیرزمینی این استان در نامطلوب‌ترین شرایط قرار دارد. استان‌های سمنان و قم نیز به‌دلیل «تنش وارد بر منابع» بسیار بالا (نامطلوب‌ترین حالت) جزو استان‌های با بدترین وضعیت هستند. شکل (۵) مربوط به بعد دسترسی است. دلیل اصلی کم‌بودن مقدار بعد دسترسی برای بیش‌تر استان‌ها این است که میزان اتصال به سیستم جمع‌آوری فاضلاب برای بیش‌تر استان‌ها بسیار کم است. به‌ویژه میزان دسترسی جمعیت روستایی به سیستم جمع‌آوری فاضلاب بسیار محدود است که بیشینه آن مربوط به استان قم و برابر با ۳/۸ درصد است. در این بعد، استان‌های تهران، کردستان، آذربایجان‌غربی، اصفهان و مرکزی بهترین وضعیت را در این بخش دارند و به‌ترتیب رتبه‌های یک تا پنج را به خود اختصاص داده‌اند. هم‌چنین استان‌های قزوین، یزد، قم، لرستان و بوشهر نیز به‌ترتیب رتبه‌های ۲۷ تا ۳۱ را به خود اختصاص داده‌اند. باید به این نکته توجه داشت که با وجود تعریف شاخص «وضعیت سدها» به گونه‌ای که ظرفیت بیش از اندازه سدها منجر به نامطلوب‌شدن وضعیت این شاخص می‌شود، باز هم برخی استان‌هایی که سدسازی بیش از حد در آن‌ها منجر

به مشکلات محیط‌زیستی شده است، در این شاخص امتیاز بالایی کسب کرده‌اند. به‌طور مثال، برای استان آذربایجان‌غربی مقدار این شاخص ۰/۷۵ برآورد شده است. این مسأله را می‌توان این‌طور توضیح داد که از منظر بعد دسترسی، وجود حد نسبتاً بالایی از ظرفیت سدها برای تأمین آب موردنیاز استان‌ها مطلوب است و اثرات محیط زیستی آن باید در بعد امنیت محیط زیستی در نظر گرفته شود، اما همان‌طور که گفته شد این بعد به‌دلیل نبود داده‌های موردنیاز در این ارزیابی لحاظ نشد.

برای شاخص کیفیت آب آشامیدنی، به‌دلیل در دسترس‌نبودن داده‌های مربوط به میزان آلاینده‌های موجود در آب آشامیدنی استان‌ها، از اطلاعات میزان تصفیه خانگی آب استفاده شده است که براساس آمارگیری از مصرف‌کنندگان به‌دست‌آمده است. این مسأله نیز می‌تواند در برخی موارد منجر به سوء تعبیر از شرایط استان‌ها شود، چرا که ممکن است جمعیت یک استان توانایی مالی کم‌تری برای استفاده از تصفیه‌کننده‌های خانگی آب داشته باشند و با وجود کیفیت نامناسب آب آشامیدنی، امتیاز بالایی در این شاخص به‌دست آورند یا در برخی از استان‌ها به‌دلیل تمکن مالی بالاتر، علیرغم شرایط خوب کیفیت آب آشامیدنی، استفاده از دستگاه‌های تصفیه بیش‌تر باشد.

همان‌طورکه از شکل (٦) پیداست، استان‌های هرمزگان، بوشهر و تهران سه استانی هستند که بهترین وضعیت را در بعد اقتصاد، ثبت کرده‌اند و پس از آن‌ها استان‌های مرکزی و آذربایجان‌شرقی قرار دارند. نکته جالب توجه این است که این استان‌ها در شاخص «بهره‌وری آب در صنعت» نیز جزو پنج استان برتر هستند و در واقع شرایط مناسب در این شاخص، عامل اصلی زیادشدن مقدار بعد اقتصاد است.

Table 5. Assessment results-dimension scores, water security index scores and provincial rankings (1: best and 31: worst) based on geometric and arithmetic aggregation of water security index

Province	Resources	Access	Economy	Water security index	Ranking (Geometric)	Ranking (Arithmetic)
Mazandaran	0.81	0.22	0.46	0.43	1	1
East Azerbayjan	0.36	0.4	0.5	0.42	2	6
Hormozgan	0.22	0.41	0.65	0.39	3	5
Gilan	0.89	0.4	0.16	0.38	4	2
Markazi	0.23	0.48	0.51	0.38	5	9
Kurdistan	0.78	0.52	0.14	0.38	6	3
West Azerbayjan	0.34	0.59	0.26	0.38	7	11
Esfehan	0.22	0.54	0.43	0.37	8	12
Kermanshah	0.69	0.31	0.22	0.36	9	8
Lorestan	0.82	0.17	0.32	0.36	10	4
Charmahal &Bakhtiari	0.64	0.46	0.14	0.35	11	7
Ardabil	0.26	0.45	0.33	0.34	12	14
Ilam	0.72	0.36	0.14	0.33	13	10
Alborz	0.2	0.51	0.32	0.32	14	16
Fars	0.26	0.37	0.31	0.31	15	17
Golestan	0.23	0.37	0.33	0.3	16	18
Kohgiluye & Buyerahmad	0.57	0.32	0.14	0.3	17	15
Tehran	0.08	0.55	0.55	0.28	18	13
North Khorasan	0.17	0.47	0.27	0.28	19	19
Hamedan	0.23	0.32	0.26	0.27	20	21
Zanjan	0.23	0.38	0.19	0.26	21	22
Bushehr	0.15	0.12	0.65	0.23	22	20
Qazvin	0.17	0.19	0.34	0.22	23	27
Semnan	0.12	0.33	0.28	0.22	24	24
Khoozestan	0.23	0.42	0.11	0.22	25	23
Yazd	0.13	0.19	0.37	0.21	26	26
Qom	0.1	0.18	0.44	0.2	27	25
Sistan & Baluchestan	0.16	0.34	0.14	0.2	28	28
Razavi Khorasan	0.14	0.34	0.16	0.2	29	29
Kerman	0.16	0.27	0.14	0.18	30	31
South Khorasan	0.19	0.33	0.09	0.18	31	30

به‌علاوه، این استان‌ها در دیگر شاخص‌ها نیز عموماً عملکرد قابل‌قبولی ثبت کرده‌اند (بیش از ۰/۴۵) که البته این مسأله قابل انتظار است، چرا که استفاده از روش میانگین هندسی موجب شده است تا مقادیر بالا در یک شاخص نتواند کاملاً عملکرد نامطلوب در دیگر شاخص‌ها را جبران کند. بدترین عملکرد این شاخص برای استان‌های کرمان، ایلام، کردستان، خوزستان و خراسان جنوبی ثبت شده است که پنج رتبه آخر را به خود اختصاص داده‌اند. این استان‌ها نیز همگی در شاخص «بهره‌وری آب در صنعت» عملکرد نامطلوبی دارند (کم‌تر از ۰/۱).

نتایج ارزیابی شاخص امنیت آبی استانی در شکل (۷) نمایش داده شده است و جدول (۵) مقایسه رتبه‌بندی استان‌ها را با استفاده از دو روش تجمیع هندسی و حسابی نمایش می‌دهد. در این جدول، از رنگ‌بندی برای نشان‌دادن رتبه‌ها نیز استفاده شده و استان‌های با رتبه‌های بهتر با رنگ سبزتیره و استان‌های با رتبه‌های ضعیف‌تر با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. محاسبه ضرایب همبستگی بین شاخص امنیت آبی استانی و هر کدام از ابعاد، نشان داد که بعد منابع با ضریب همبستگی ۰/۶۵، نسبت به دو بعد دیگر (ضریب همبستگی امنیت آبی با بعد دسترسی ۰/۴۳ و با بعد اقتصاد ۰/۲۹ است) اثرگذاری بیش‌تری بر نتیجه ارزیابی امنیت آبی داشته است. این مسأله با توجه به انحراف معیار بزرگ‌تر بعد منابع به نسبت دو بعد دیگر قابل‌توجیه است، چرا که مقادیر دو بعد دیگر برای استان‌های مختلف به هم نزدیک‌تر است و تفاوت زیاد مقادیر بعد منابع اثر بیش‌تری بر تجمیع می‌گذارد.

استان‌های واقع در مرز شرقی و قسمت‌های شرقی فلات مرکزی، استان‌هایی هستند که در همه شاخص‌ها وضعیت ضعیف‌تری نسبت به بقیه استان‌ها دارند و طبیعتاً در ارزیابی امنیت آبی نیز رتبه‌های آخر را به خود اختصاص داده‌اند. استان‌های قم، سیستان و بلوچستان، خراسان‌رضوی، کرمان و خراسان‌جنوبی از نظر شاخص امنیت آبی، پنج استان با بدترین شرایط ارزیابی شده‌اند. دلیل اصلی کسب رتبه آخر شاخص امنیت آبی برای استان خراسان جنوبی با امتیاز ۰/۱۸، شرایط بسیار ضعیف در بعد اقتصاد است. این استان با امتیاز ۰/۰۹ در بعد اقتصاد بدترین شرایط را در این بعد دارد و لازم است که به ارتقای بعد اقتصاد در این استان توجه بیش‌تری شود. به‌ویژه دو شاخص میزان آبیاری نوین و بهره‌وری آب در صنعت نیاز به ارتقا دارند. استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و خراسان رضوی به‌طور عمده در دو بعد اقتصاد و منابع، وضعیت ضعیفی دارند که این مسأله منجر به کسب امتیاز پایین برای آن‌ها در شاخص امنیت آبی شده است. بهبود عملکرد این استان‌ها در دو شاخص تنش وارد بر منابع و بهره‌وری آب در صنعت نیز می‌تواند وضعیت این استان‌ها را بهبود ببخشد.

استان‌های مازندران و گیلان به‌ترتیب رتبه‌های اول و چهارم شاخص امنیت آبی را به کسب کرده‌اند. مقدار بالای شاخص منابع دلیل اصلی کسب این رتبه برای این دو استان است (برای گیلان عدد ۰/۸۹ و برای مازندران عدد ۰/۸۱ برآورد شده است). البته مقادیر متوسط دو بعد دیگر نیز به این مسأله کمک کرده است. رتبه‌های دوم و پنجم در ارزیابی امنیت آبی، به‌ترتیب متعلق به استان‌های آذربایجان‌شرقی و مرکزی است. این دو استان به‌دلیل عملکرد مناسب در بعد اقتصاد (رتبه‌های چهارم و پنجم در بعد اقتصاد) و متعادل‌بودن مقادیر ابعاد نسبت به هم در ارزیابی کلی، رتبه‌های ذکرشده را کسب کرده‌اند. استان هرمزگان که بهترین عملکرد در بعد اقتصاد را ثبت کرده است، در شاخص امنیت آبی نیز رتبه سوم را به خود اختصاص داده است.

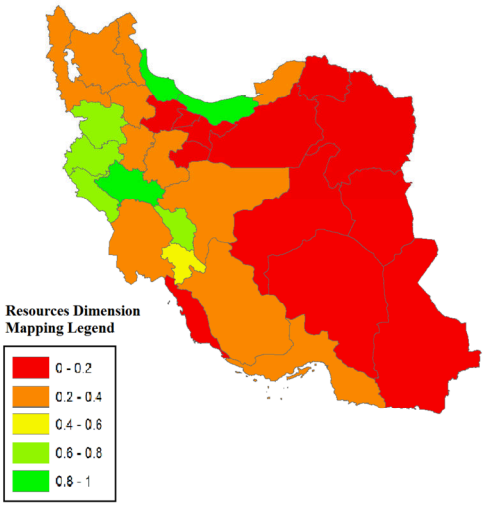

Figure 2. Resources dimension mapping

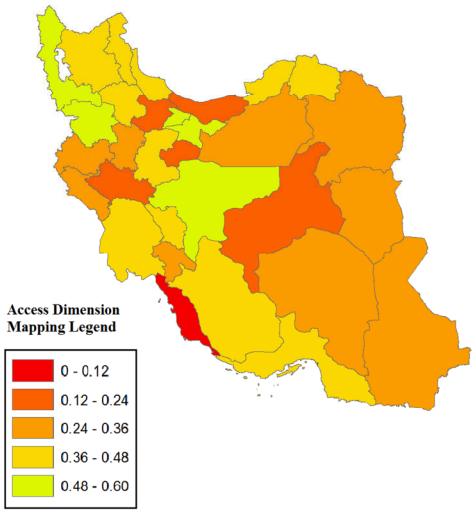

Figure 3. Access dimension mapping

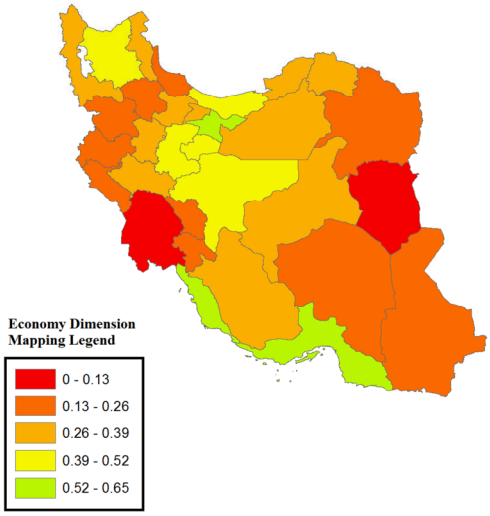

Figure 4. Economy dimension mapping

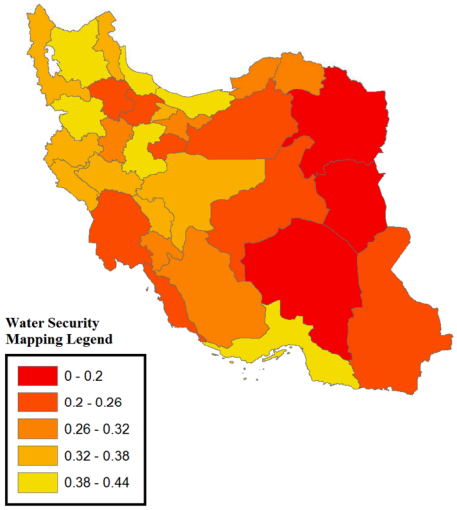

Figure 5. Water security mapping

اثر استفاده از روش تجمیع هندسی نیز در نتایج کاملاً مشهود است و در مقایسه با روش حسابی، استان‌هایی که مقادیر ابعاد متعادل‌تری دارند، رتبه‌های بهتری کسب کرده‌اند. برای مثال استان لرستان در بعد منابع، مقدار بالا و در بعد دسترسی مقدار بسیار کمی دارد. در صورت استفاده از روش تجمیع حسابی، این استان رتبه چهارم را کسب می‌کند در صورتی‌که استفاده از روش تجمیع هندسی، این استان را در رتبه دهم قرار می‌دهد.

جمع‌بندی و پیشنهادات

نتایج ارزیابی امنیت آبی در استان‌های ایران نشان داد که استان‌ها در بهترین حالت، وضعیت متوسطی از نظر شاخص امنیت آبی دارند و بیش‌تر استان‌ها از شرایط نامطلوب امنیت آبی برخوردارند. استان‌های واقع در مرز شرقی کشور و فلات مرکزی عمدتاً بدترین شرایط امنیت آبی را دارند. امنیت آبی نامناسب در مرز شرقی کشور با یافته‌های Taheri Rikande (2016) و Zekri (2017)

مشابهت دارد. استان‌های گیلان و مازندران به‌دلیل وضعیت بسیار خوب در بعد امنیت منابع، آذربایجان‌شرقی و مرکزی به‌دلیل وضعیت متعادل در ابعاد کلیدی امنیت آبی و استان هرمزگان به‌دلیل ثبت بهترین وضعیت در بعد امنیت آبی از منظر اقتصادی توانستند پنج رتبه اول را در شاخص امنیت آبی کسب کنند. افزایش امنیت آبی در استان‌ها نیازمند بررسی جداگانه هر استان و شناسایی نقاط ضعف آن‌ها و در نهایت اعمال سیاست‌های مناسب برای بهبود وضعیت هر کدام است. بررسی نتایج این پژوهش نشان داده است که یک راهبرد کلی که می‌تواند به افزایش امنیت آبی در اکثر استان‌ها کمک کند، کاهش تدریجی سطح زیر کشت آبیاری‌شده با منابع آب زیرزمینی و گسترش صنایع با نیاز آبی پایین و اختصاص آب به آن‌هاست. این رویکرد به‌همراه تغییر الگوی کشت به محصولات با نیاز آبی پایین، به‌تدریج می‌تواند تنش وارد بر منابع را کاهش دهد، از تخلیه بیش‌تر این مخازن جلوگیری کند و حتی پس از مدتی منجر به افزایش تدریجی سطح آبخوان‌ها شود. این رویکرد هم‌چنین منجر به افزایش بهره‌وری استفاده آب در صنعت و کشاورزی می‌شود. تغییرات ذکرشده منجر به بهبود عملکرد شاخص‌هایی در دو بعد منابع و اقتصاد می‌شود که اکثر استان‌ها در آن‌ها عملکرد مطلوبی ندارند. یافته‌های Ansari *et al.* (2019) در حوضه طشک، بختگان، مهارلو نیز موید اهمیت کاهش سطح زیرکشت اراضی کشاورزی برای ارتقای امنیت آبی در این حوضه بوده است.

عدم دسترسی به داده‌های اساسی موردنیاز برای ارزیابی دو بعد کلیدی امنیت آبی یعنی بعد امنیت آبی از منظر محیط‌زیستی و بعد بحران‌های حدی، موجب شد تا این دو بعد از ارزیابی کنار گذاشته شوند. در صورتی‌که به نحوی این داده‌ها که اکثراً جنبه محرمانه دارند و یا اساساً پایش نمی‌شوند در دسترس قرار بگیرند، با اضافه‌کردن دو بعد کلیدی فوق‌الذکر، می‌توان تصویر جامع‌تر و دقیق‌تری از امنیت آبی در ایران به‌دست آورد که می‌تواند ابزاری قدرتمند برای سیاست‌گذاری مدیریت منابع آب و محیط زیست در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. Global Water Partnership
2. Withdrawal to Availability
3. Composite Indicator
4. World Water Forum
5. Asian Development Bank
6. Top-Down Approach
7. Bottom-Up Approach
8. Normalization
9. Max-Min
10. Middle East & North Africa
11. Human Development Index
12. Technology Achievement Index
13. Compensation
14. Partially Compensatory
15. Tennant
16. Limari

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

ADB. (2016). *Asian Water Development Outlook 2016 Description of Methodology and Data*. Retrieved from: https://www.adb.org/publications/awdo-2016-description-methodology-data.

ADB. (2020). *Asian Water Development Outlook 2020 Strengthening Water Security in Asia and the Pacific*. Retrieved from: https://www.adb.org/sites/default/files/publication/663931/awdo-2020.pdf.

Ansari, S., Masah Bovani, A., Bagheri, A. (2019). Evaluation of Adaptation Strategies to Climate Change Based on Social, Economic and Environmental Water Security Indicators. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 237-253 (In Persian).

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11.

Daneshvar, M., Syst, E., Reza, M., Daneshvar, M., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran : facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-10.

Desai, M., Fukuda-Parr, S., Johansson, C., & Sagasti, F. (2002). Measuring the Technology Achievement of Nations and the Capacity to Participate in the Network Age. *Journal of Human Development*, 3(1), 95-122.

Falkenmark, M. (1989). The massive water scarcity now threatening Africa. *Ambio* 18(2), 112-118.

Ghiami-shamami, F., & Sabziparvar, A. A. (2018). Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 875-897 (2019).

GWP Workshop. (2014a). *Assessing water security with appropriate indicators*. Retrieved from: https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/p763_gwp_proceedings_paper.pdf

GWP Workshop. (2014b). *Water Security: Putting the Concept into Practice*. Retrived from: https://aquadoc.typepad.com/files/gwp_tec20_web.pdf.

Jensen, O., & Wu, H. (2018a). Urban water security indicators: Development and pilot. *Environmental Science and Policy*, 83, 33-45.

Karandish, F., & Mousavi, S. (2018). Climate change uncertainty and risk assessment in Iran during twenty-first century: evapotranspiration and green water deficit analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1-2), 777-791.

Krueger, E., Rao, P. S. C., & Borchardt, D. (2019). Quantifying urban water supply security under global change. *Global Environmental Change*, 56, 66-74.

Liu, G. (2014). Development of a general sustainability indicator for renewable energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 611-621.

Ma, H., Liu, L., & Chen, T. (2010). Water security assessment in Haihe River Basin using principal component analysis based on Kendall τ. *Environmental Monitoring and Assessment*, 163, 539-544.

Mason, N., & Calow, R. (2012). *Water security: from abstract concept to meaningful metrics. An initial overview of options*. Retrived from: files.ethz.ch/isn/155568/7865.pdf.

Moridi, A. (2017). State of Water Resources in Iran. *International Journal of Hydrology*, 1(4), 111-114.

Munda, G. (2016). Multiple Criteria Decision Analysis and Sustainable Development. In: Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. *International Series in Operations Research & Management Science*, 78. New York, Springer.

Munda, G., & Nardo, M. (2005). *Constructing Consistent Composite Indicators: the Issue of Weights*. Retreived from: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC32434.

Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A., & Giovannini, E. (2005). *Handbook on constructing composite indicators*. OECD Statistics Working Papers. 2005/03, Paris, OECD Publishing.

OECD. (2013), W*ater Security for Better Lives, OECD Studies on Water*. Paris, OECD Publishing.

Puig, M., Wooldridge, C., & Darbra, R. M. (2014). Identification and selection of Environmental Performance Indicators for sustainable port development. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1), 124-130.

Raskin, P. D., Mansen, E., & Margolis, R. M. (1996). Water and sustainability Global patterns and long-range problems. *Natural Resources Forum*, 20(I), 1-15.

Ray, B., & Shaw, R. (2019). Developing Water Security Index for Urban Areas. In: Ray B., Shaw R. (eds) *Urban Drought - Disaster Risk Reduction (Methods, Approaches and Practices)*. Singapore, Springer.

Scott, C. A., Vicuña, S., Blanco-Gutiérrez, I., Meza, F., & Varela-Ortega, C. (2014). Irrigation efficiency and water-policy implications for river basin resilience. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(4), 1339-1348.

Sullivan, C. (2002). Calculating a Water Poverty Index.*Water Development.* 30(7), 1195-1210.

Taheri Rikande, E. (2016) *Investigation of the Relationship Between Food Self-Sufficiency and Water Security in Iran*. Master's Thesis. University of Tehran, Iran. (In Persian).

Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10.

United Nations. (2013). *Water Security and the Global Water Agenda. A UN-Water Analytical Brief*. 2014 Revision. Hamilton, Canada, UN University.

United Nations Development Programme. (2010). *Human Development Report 2010-The Real Wealth of Nations: Pathways to Human Development.* Retreived from: http://hdr.undp.org/en/content/human-development-report-2010.

Yang, F., Shao, D., Xiao, C., & Tan, X. (2012). Assessment of urban water security based on catastrophe theory. *Water Science and Technology*, 66(3), 487-493.

Zekri, E. (2017). *Assessment of Water Security in One of the Major Basins of Iran*. Master's Thesis. University of Tehran, Iran. (In Persian).

Zhou, P., & Ang, B. W. (2009). Comparing MCDA aggregation methods in constructing composite indicators using the Shannon-Spearman measure. *Social Indicators Research*, 94(1), 83-96.

WWC. (2000). Ministerial Declaration of The Hague on Water Security in the 21st Century. Retreived from: https://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/world_water_council/documents/world_water_forum_2/The_Hague_Declaration.pdf.

Xiao, S. C., Li, J. X., Xiao, H. L., & Liu, F. M. (2008). Comprehensive assessment of water security for inland watersheds in the Hexi Corridor, Northwest China. *Environmental Geology*, 55(2), 369-376.