Review Paper

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 14
No. 1 (53)

Received:
2023-10-10

Accepted:
2023-12-01

Pages: 115-132

Classification of Groundwater Sustainability Assessment Indicators in Aquifers of Arid and Semi-Arid Regions

Susan Hayeri Yazdi[1], Maryam Robati [2*], Saeideh Samani [3] and Fariba Zamani Hargalani

1) PhD Student in Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Azad University, Tehran Science and Research Branch.
2) Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.
3) Assistant Professor, Department of Water Resources Study and Research, Water Research Institute, Tehran, Iran.
4) Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.
*Corresponding author emails: maryamrobati1984@gmail.com, m.robati@srbiau.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Considering the increasing dependence of humans on fresh water, especially groundwater, which is the most important source of water supply in arid and semi-arid regions, assessing the sustainability of aquifers is crucial. In this regard, assessment indicators are used, which usually do not have a clear boundary between the classification of indicators and they overlap with each other in different fields such as economy, society and environment. Also, researchers usually rely on a number of indicators that can be measured for their case study. Due to this lack of data, in this article, an attempt has been made to collect and categorize various indicators that have been used to assess groundwater in aquifers in arid and semi-arid regions of the world.

Method: This research has been a literature review of previous articles and studies in the world in the field of assessing the sustainability of groundwater based on different indicators. The course of movement and progress of these indicators in articles and their classification in environmental, social, economic and institutional categories has been in the framework of this research. Also, the composite indicators that have been prepared for topics under the sustainability subcategory, such as the water poverty index, have been considered in this research. The water poverty indicator is a subset of the competition criterion and a social indicator. This indicator has been proposed as a subset of the water competition criterion, which is an important indicator for measuring the level of poverty caused by water scarcity, especially in arid and semi-arid lands such as significant parts of West Asian countries. In other words, this indicator connects water and poverty.

Results: The results indicate that the environmental indicators with a share of 63% have the highest number among the articles and physical indicators include more than half of the environmental indicators. After that, economic indicators with 18%, social indicators with 14% and institutional indicators with 7% are in the next ranks in terms of numbers, which shows the attention of experts to the importance of the environment and economy on the sustainability of aquifers.

Conclusion: Although social indicators comprise only 13% of all indicators, but due to their importance and weight, they need more studying. Also, these types of indicators are mainly dependent on the case study, so using the studies of sociologists is a great help for real investigation and it will aim at the sustainability of aquifers. Also, due to the fact that sustainability evaluation is an interdisciplinary field, the selection of its indicators needs strong theoretical foundations, therefore, team work with the presence of different experts will increase the quality of the study results. Considering that the institutional indicators mainly play the role of the answer in the issue of aquifer sustainability, therefore, compiling institutional indicators in the future and including a logical weight for these indicators during the assessment of sustainability is very important in raising the quality of the assessment. Institutional indicators are mainly related to governance, and considering that the development approach is to reduce the concentration of management from top to bottom, there are fewer institutional indicators and the focus is on other indicators.

Keywords: fresh water, social indicators, sustainability assessment, water poverty index

مقاله مروری

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال چهاردهم
شماره ۱ (۵۳)

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۹/۱۰

صفحات: ۱۳۲-۱۱۵

طبقه بندی شاخص‌های ارزیابی پایداری آب زیرزمینی در آبخوان‌های مناطق خشک و نیمه خشک

سوسن حایری یزدی[۱]، مریم رباطی[۲*]، سعیده سامانی[۳] و فریبا زمانی هرگلانی[۴]

۱) دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده موضوعی کشاورزی آب غذا و فراسودمندها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران.
۲) استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده موضوعی کشاورزی آب غذا و فراسودمندها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران.
۳) استادیار، عضو هیأت علمی دانشگاه موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب.
۴) استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده موضوعی کشاورزی آب غذا و فراسودمندها، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی ، تهران، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: maryamrobati1984@gmail.com, m.robati@srbiau.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: با توجه به وابستگی روزافزون انسان به آب شیرین به ویژه آب زیرزمینی که مهمترین منبع تامین آب در سرزمین‌های خشک و نیمه خشک است، مطالعه پایداری وضعیت آبخوان‌ها امری ناگزیر است. در این راستا از شاخص‌های ارزیابی استفاده می‌شود که معمولا مرز مشخصی بین دسته بندی شاخص‌ها وجود ندارد و در زمینه‌های مختلفی مانند اقتصاد، اجتماع و محیط زیست با یکدیگر همپوشانی دارند. همچنین معمولا پژوهشگران به تعدادی شاخص که برای مطالعه موردی ایشان قابل اندازه گیری باشد اکتفا می‌کنند. به دلیل این کمبود، در این مقاله سعی شده است شاخص‌های متنوعی که برای ارزیابی آب زیرزمینی در آبخوان‌های مناطق خشک و نیمه خشک جهان استفاده شده است جمع آوری و طبقه بندی گردد.

روش پژوهش: این پژوهش مطالعه‌ای بر مقالات و مطالعات پیشین ایران و جهان در زمینه ارزیابی پایداری آب زیرزمینی برمبنای شاخص‌های مختلف بوده است. سیر حرکت و پیشرفت این شاخص‌ها و دسته بندی آنها در گروه‌های محیط زیستی، اجتماعی، اقتصادی و نهادی در قالب این پژوهش تعریف شده است. همچنین شاخص‌های ترکیبی نیز که برای مباحث زیرمجموعه پایداری تدوین شده اند مانند شاخص فقر آبی در این پژوهش مد نظر قرار گرفته است. شاخص فقر آبی زیرمجموعه معیار رقابت و شاخصی اجتماعی معرفی شده است. این شاخص به عنوان زیرمجموعه‌ای از معیار رقابت آبی مطرح شده است که به ویژه در سرزمین‌های خشک و نیمه خشک مانند بخشهای قابل توجهی از کشورهای غرب آسیا شاخص مهمی برای سنجش میزان فقر ناشی از کمبود آب مطرح است. به عبارتی این شاخص، آب و فقر را به هم پیوند می‌دهد.

یافته‌ها: نتایج حاکی از آن است که شاخص‌های محیط زیستی با سهم ۶۳ درصدی بیشتری تعداد را در بین مقالات داشته اند و شاخص‌های فیزیکی بیش از نیمی از شاخص‌های محیط زیستی را شامل می‌شود. پس از آن شاخص‌های اقتصادی با ۱۸ درصد، شاخص‌های اجتماعی با ۱۴ درصد و شاخص‌های نهادی با ۷ درصد در رتبه‌های بعدی از لحاظ تعداد قرار دارند که نشاندهنده توجه صاحب نظران به اهمیت محیط زیست و اقتصاد بر پایداری آبخوان‌ها است.

نتایج: اگرچه شاخص‌های اجتماعی فقط ۱۳ درصد از کل شاخص‌ها را در بر دارد اما به دلیل اهمیت و وزن بالای آنها نیاز به مطالعه بیشتر دارد همچنین این نوع شاخص‌ها عمدتا وابستگی به منطقه مورد مطالعه دارند لذا استفاده از از مطالعات جامعه شناسان کمک شایانی به بررسی حقیقی و هدفمند پایداری آبخوان‌ها خواهد کرد. همچنین با توجه به اینکه ارزیابی پایداری، دیدگاهی بین رشته‌ای است، انتخاب شاخص‌های آن نیاز به مبانی نظری قوی دارد لذا کار گروهی با حضور متخصصان مختلف منجر به بالا رفتن کیفیت نتیجه مطالعات خواهد شد. با توجه به اینکه شاخص‌های نهادی عمدتا نقش پاسخ را در موضوع پایداری آبخوان دارند لذا تدوین شاخص‌های نهادی در آینده و لحاظ نمودن وزن منطقی برای این شاخص‌ها در حین ارزیابی پایداری اهمیت به سزایی در بالا بردن کیفیت ارزیابی دارد. شاخص‌های نهادی عمدتا مرتبط با حکمرانی هستند و با توجه به اینکه رویکرد توسعه یافتگی کاهش تمرکز مدیریت از بالا به پایین است، شاخص‌های نهادی تعداد کمتری دارند و تمرکز بر سایر شاخص‌ها قرار گرفته است.

کلید واژه‌ها: آب شیرین، ارزیابی پایداری، شاخص فقر آبی، شاخص‌های اجتماعی

مقدمه

آب زیرزمینی منبع ارزشمندی از آب شیرین است که از سلامت انسان، توسعه اجتماعی-اقتصادی و عملکرد اکوسیستم‌ها در تمام مناطق، از جمله مناطق شهری و روستایی کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه حمایت می‌کند. این منابع نیاز آب آشامیدنی بیش از نیمی از جمعیت جهان و ۴۳ درصد از کل آب مورد نیاز آبیاری را تامین می‌کند. از سوی دیگر، نیاز روزانه حدود ۲،۵ میلیارد نفر در سراسر جهان به آب تنها از طریق منابع آب زیرزمینی تامین می‌شود (Zarei, Parizi et al. 2022). همچنین هدف ششم از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد - که در سال ۲۰۲۰ راه اندازی شد - بر نقش استراتژیک توسعه ظرفیت برای اطمینان از دسترسی و مدیریت پایدار آب تأکید دارد(UN, 2021) . همچنین آب زیرزمینی منبع حیاتی مهم برای تولید محصولات کشاورزی، حفظ اکوسیستمها، تأمین نیاز آب شرب و خدمات و صنعت است و برای تأمین نیاز آب شرب و بهداشت بیش از ۲ میلیارد ساکن شهری از محل آب زیرزمینی نشان از اهمیت ویژه آن دارد (Mahdavi and Hosseini, 2019).

مطالعات مختلفی در زمینه ارزیابی پایداری آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌ها در کشورهای مختلف انجام شده است که به عنوان مثال در یک تحقیق در سال ۲۰۲۳ از شاخص‌های قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری[1] برای ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی در دسترس بودن و پایداری آب زیرزمینی در بنگلادش استفاده شده است. نتایج بررسی حاکی ازین بود که آب‌های زیرزمینی پایداری بسیار ضعیفی را برای اکثر مناطق این کشور نشان دادند (Fahim et al. 2023). در پژوهش دیگری به ارزیابی کمی پایداری آب‌های زیرزمینی کم عمق در دشت چین شمالی پرداخته شده است. این پژوهشگران نیز مانند مطالعه قبلی از شاخص‌های قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده کردند نتایج حاکی ازین بود که سطح قابلیت اطمینان در اکثر مناطق کمتر از حد متوسط است و پایداری ضعیف اکثر سفره‌های آبخوان را تهدید می‌کند (Zhou et al. 2023). در پژوهش کیفی دیگری با تاکید بر کیفیت آب از شاخص آلودگی Nemarow برای بررسی وضعیت آبخوان مورد نظر در کشور پاکستان پرداختند. این شاخص ابزار مهمی برای تخمین وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی از لحاظ آلودگی است و برای محاسبه آن از ۲۰ پارامتر مختلف استفاده می‌شود. نتایج حاکی ازین بود که آب زیرزمینی منطقه معدنی اطراف معادن کرومیت[2] باید قبل از مصرف برای کارهای خانگی و کشاورزی به درستی تصفیه شود(Rashid et al. 2023). برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری پایدار در منطقه‌ای نیمه خشک در کشور غنا از شاخص‌های آب آبیاری برای بررسی کیفی آبخوان‌ها استفاده شده است. نتایج به طور کلی حاکی از آن است که آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه برای مصارف آبیاری مناسب هستند و مطالعات بیشتری باید برای بیان دقیق کیفیت آب مصرفی برای مصارف شرب و خانگی انجام شود(Iddrisu et al. 2023).

در تحقیق دیگری برای ساخت شاخص مدیریت پایدار آب زیرزمینی اقدام شده است به طوری که شامل اجزا محیط زیستی، اجتماعی، اقتصادی و سازمانی باشد. به این منظور از ترکیب ۴ شاخص استفاده شده است: ردپای آب زیرزمینی، تراکم جمعیت، درصد آب زیرزمینی مورد استفاده در صنعت و کشاورزی، تراکم چاه‌های تحت نظارت در ۴۴۳ آبخوان. نتیجه نهایی حاکی از این است که ۳۲ درصد از آبخوان‌های ایران از لحاظ مدیریت پایدار در شرایط ضعیف و بسیار ضعیف قرار دارند (Zarei et al. 2022). در پژوهش دیگری برای ارزیابی پایداری آب زیرزمینی در مقیاس محلی با تمرکز بر استخراج آب زیرزمینی از سری داده‌های سطح آب، یک شاخص پایداری آب‌های زیرزمینی بر اساس پاسخ به استخراج برای ارزیابی بهتر پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی، اثرات استخراج آب‌های زیرزمینی بر پایداری را مشخص می‌کند و کمک می‌کند تا تعامل بین فعالیت‌های انسانی و منابع آب زیرزمینی بهتر درک شود (Fang et al. 2022). در تحقیقی دیگر به مروری بر وضعیت منابع آب زیرزمینی در شمال آفریقا و ارزیابی پایداری آبخوان پرداخته شده است. در این پژوهش از یک مدل برای مطالعه تغییرات هیدرودینامیکی و شیمیایی سفره‌های زیرزمینی بر اساس چندین شاخص کم‌آبی و اقتصادی-اکولوژیکی، استفاده شده است. بر اساس شواهد جمع آوری شده، کمبود آب به شدت بر تعادل این منابع تأثیر گذاشته است و برنامه‌های حفاظتی اتخاذ شده برای اطمینان از انگیزه‌های اقتصادی برای حفاظت از منابع طبیعی محیط زیست ناکافی بوده است (Besser & Daouadi, 2022) . شمال شیلی، کاهش آب‌های زیرزمینی در نتیجه شرایط نیمه خشک و تقاضای بالای آب وجود داشته است، که منجر به درگیری‌های اجتماعی بزرگی شده است بنابراین برای بررسی کاهش آب‌های زیرزمینی در دو حوضه آبخیز در کشور شیلی از طریق یک رویکرد بین رشته‌ای پرداخته شده است. به این منظور شاخص بارش استاندارد شده (SPI)[3] و شاخص گیاهی تفاوت نرمال شده (NDVI)[4] محاسبه شده است و تغییر کاربری زمین در سال‌های ۲۰۰۲-۲۰۱۷ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج تأیید کرد که کاهش سطح آبخوان بیشتر تحت تأثیر عوامل انسانی به دلیل بهره برداری بیش از حد توسط کشاورزی و عدم مدیریت آب است (Duran-Llaver et al. 2022). مطالعه دیگری برای بررسی تغییر ویژگی‌های پایداری آب‌های

زیرزمینی در پاکستان از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۶ انجام شده است. روش این مطالعه استفاده از شاخص‌های پیشتر نامبرده شده قابلیت اطمینان - تاب‌آوری - آسیب‌پذیری بوده است. در این مطالعه برای ارزیابی پایداری سفره‌های زیرزمینی برای دوره‌های مختلف با شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر پایداری آب‌های زیرزمینی در پاکستان بررسی شده است. نتایج نشان داد کاهش سطح آب زیرزمینی در مناطقی که کشاورزی بیشتر است، شدت بیشتری داشته و منجر به بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری مزارع می‌شود (Ahmed et al. 2022). از پژوهشهای شاخص محور دیگر تحقیقی برای ارزیابی پایداری آب زیرزمینی در منطقه‌ای در غرب ایران بوده است. پژوهشگران در این تحقیق پس از انتخاب شاخص‌ها نسبت به تبدیل شاخص‌های کیفی به کمی با روش DELPHI پرداختند وزن دهی به شاخص‌ها را با روش AHP انجام داده اند. نتیجه نهایی تحقیق آنها، تدوین نقشه حاوی مناطق: پایدار، تاحدودی پایدار، ناپایدار، شدیدا ناپایدار بوده است (Majidpour et al. 2021).در تحقیق دیگر برای پرداختن به توسعه شاخص پایداری آب‌های زیرزمینی پنج بعد از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است که بر اساس پانزده شاخص انتخاب شده برای مطالعه تعریف شده است. AHP به منظور ارزیابی اهمیت ابعاد انتخاب شده آب زیرزمینی به کار گرفته شده است. نتایج این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که وضعیت منابع آب زیرزمینی در منطقه هشدار دهنده است و آینده منابع آب زیرزمینی در خطر است (Singh & Bhakar, 2021). در اقدام دیگری در سال ۲۰۲۰ یک شاخص ترکیبی برای ارزیابی پایداری آب زیرزمینی ساخته شده است. برای این کار با استفاده از AHP پنج شاخص برای این کار انتخاب شده که هر دو بعد کمی و کیفی منابع را در نظر می‌گیرند و پایداری اقتصادی و محیط زیستی و رفاه اجتماعی را منعکس می‌کنند. در نهایت با GIS[۵] شاخص پایداری در منطقه آزمایشی را پهنه بندی گردیده. پایداری کلی منابع آب زیرزمینی در منطقه بین درجات متوسط تا ضعیف متوسط تا ضعیف متفاوت است که ضرورت نظارت مستمر و مدیریت بهتر منابع آب زیرزمینی را برجسته می‌کند(Hagagg & Sadek, 2020). برای تحلیل حساسیت شاخص خطر آب زیرزمینی در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا شاخص خطر آب زیرزمینی (GRI)[۶] تدوین شده است و یک شاخص ترکیبی برای آسیب پذیری آب آب‌های زیرزمینی تدوین یافته است(Milewski et al. 2020). برای ارزیابی پایداری آب زیرزمینی کل ایران یک شاخص ترکیبی ساخته شده است. این شاخص ترکیبی بر اساس تجمیع وزنی سیزده شاخص اتخاذ شده از طریق روش‌های تصمیم گیری چند معیاره (MCDM) توسعه یافته است. مقادیر این شاخص وضعیت مدیریت پایدار آب زیرزمینی برای کل کشور ایران را نشان می‌دهد (Hosseini et al. 2019). برای ارائه یک چارچوب درجهت ارزیابی پایداری آب زیرزمینی در هانوی ویتنام از ترکیب رویکرد متداول ارزیابی پایداری و AHP استفاده شده است. در چارچوب پیشنهادی، سه رکن اصلی (محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی) مفهوم پایداری در نظر گرفته شد. بر اساس داده‌های قابل اعتماد موجود از مشکلات فعلی در منطقه مورد مطالعه ایشان، سه جنبه اصلی پایداری (کمیت، کیفیت و مدیریت) پیشنهاد شده است و بر این اساس، دوازده شاخص پایداری محیط زیستی انتخاب شده است. شاخص‌های پایداری کمیت، کیفیت و جنبه‌های مدیریتی آب‌های زیرزمینی به‌طور مناسب در سطوح قابل قبول ارزیابی شدند، که در نتیجه هانوی در شاخص پایداری محیطی نهایی در سطح قابل قبولی قرار گرفت(Bui et al. 2019). همان گروه پژوهشی در سال ۲۰۱۸ نیز به ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در همان منطقه صرفا از دیدگاه اجتماعی پرداختند و یک چارچوب ارزیابی پایداری اجتماعی منابع آب زیرزمینی را برای اولین بار ارائه کردند. برای تولید مولفه‌های اصلی (جنبه‌ها و شاخص‌ها) این چارچوب از رویکرد فرآیند AHP استفاده شد. برای غلبه بر شرایط چالش برانگیز، مشکلات فعلی منابع آب زیرزمینی هانوی را بررسی کرده و ۳ جنبه اصلی (کمیت، کیفیت و مدیریت) را پیشنهاد کرده اند و ۱۳ شاخص پایداری را انتخاب نموده اند(Bui et al. 2018). برای ارزیابی پایداری آب‌های زیرزمینی در جزایر کوچک از شاخص‌هایی مانند امنیت آب، کیفیت آب، آب آشامیدنی، بهداشت، زیرساخت‌ها، اقلیم، تنوع زیستی و حکمرانی استفاده شده است (Fabian et al. 2018).یکی از کارهای تحقیقاتی جالب توجه در سال ۲۰۱۷ انجام شده است که هدف کلی این مطالعه ارزیابی چگونگی شاخص‌های مربوط به مصرف و مدیریت عملکرد آب در برابر مجموعه‌ای از معیارهای پایداری بوده است. در تحقیق ایشان ۱۷۰ شاخص مرتبط با مصرف و مدیریت آب شناسایی شده است. این شاخص‌ها توسط یک هیات بین المللی از کارشناسان ارزیابی شدند و بررسی کردند که آیا این شاخص‌ها چهار معیار پایداری را برآورده می‌کنند: اجتماعی، اقتصادی، محیط زیستی و نهادی. همچنین این پژوهشگران از یک ماتریس ارزیابی استفاده کردند که همه شاخص‌ها را بر اساس چارچوب DPSIR[۷] (نیروهای محرک، فشارها، حالت‌ها، تأثیرات و پاسخ‌ها) طبقه‌بندی کنند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که ۲۴ شاخص با اکثریت معیارهای پایداری مطابقت دارند. ۵۹ شاخص دو بعدی هستند (به این معنی که با دو معیار پایداری مطابقت دارند). ۸۶ شاخص تک بعدی هستند (فقط یکی از چهار معیار پایداری را برآورده می‌کنند) و یک شاخص هیچ یک از معیارهای پایداری را برآورده نمی کند. همچنین فهرست این ۱۷۰ شاخص از طرف این پژوهشگران منتشر شده است. لازم به

ذکر است که این شاخص‌ها مربوط به انواع آب بوده و شاخص‌های مرتبط با آب زیرزمینی، زیرمجموعه‌ای از این ۱۷۰ شاخص است (Pires et al. 2017). در مطالعه‌ای دیگر رویکردی جامع برای ارزیابی سفره‌های زیرزمینی مشترک تدوین شده است. در این تحقیق چارچوب DPSIR برای شناسایی مسائل کلیدی و انتخاب شاخص‌های متناسب با مشکلات محلی استفاده شده است. موضوعات مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و به اجزاء تبدیل شدند و زنجیره علیت را از نیروهای محرک تا تأثیرات و واکنش توصیف می‌کردند. بنابراین، متغیرهای گروه‌بندی شده در نیروهای محرک، فشارها، حالت‌ها، اثرات و پاسخ‌ها شناسایی شدند که می‌توانند به عنوان شاخص‌هایی برای ارزیابی و مدیریت سفره‌های زیرزمینی مشترک استفاده شوند. به نظر می‌رسد ساختار پیشنهادی برای هماهنگ کردن نیازها و شاخص‌های اطلاعاتی و حمایت از همکاری بین آژانس‌های مسئول مدیریت و توسعه سفره‌های زیرزمینی مشترک تامین‌کننده شهر مکزیکوسیتی مناسب باشد(Martinez et al. 2015). در سال ۲۰۱۱ یک چارچوب در ارزیابی پایداری آب زیرزمینی تدوین شده است. به این منظور یک چارچوب ساختاریافته ایجاد شده که شاخصی با عنوان، «شاخص زیرساخت پایداری آب‌های زیرزمینی [۸](GSII)» را به عنوان معیاری برای پایداری آب‌های زیرزمینی در نظر می‌گیرد. این شاخص ترکیبی از ۱۶ شاخص مختلف است. نتایج مطالعه نشان داد که وضعیت کلی «زیرساخت‌های پایداری آب زیرزمینی» در منطقه مورد مطالعه نسبتا ضعیف است(Pandey et al. 2011). روشی دیگر برای ارزیابی پایداری آبخوان‌ها استفاده از شاخص رد پای آب زیرزمینی یا GF[۹] بوده است. به عنوان مثال پایداری ۲۷ آبخوان آبرفتی در شرق دریاچه ارومیه شمال غرب ایران توسط نشانگر رد پای آب زیرزمینی بررسی شده است (Mahdavi & Hosseini, 2019). در مطالعه‌ای دیگر برای ارزیابی مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه آبریز ارس از رویکرد DPSIR استفاده شده است. این پژوهشگران، معیارهای پایداری را به سه دسته محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی دسته بندی نمودند که دو معیار نخست هر کدام دارای دو شاخص و معیار سوم، دارای یک شاخص برای مدلسازی در نظر گرفته شده است. در نتیجه مدلسازی و تصمیمگیری، گزینه افزایش بازده مصرف آب به عنوان گزینه برتر انتخاب گردید(Panahi et al. 2017) .

در تحقیق حاضر جمع بندی کلی درخصوص شاخص‌های استفاده شده در موارد فوق صورت پذیرفته است.

تمرکز مقاله بر طبقه بندی شاخص‌های اقتصادی، محیط زیستی، نهادی و اجتماعی و همچنین دسته بندی‌های زیر مجموعه محیط زیستی شامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی قرار خواهد گرفت. اما فهرست کلی شاخص‌ها در پیوست (۱) درج شده است. سپس به تحلیل شاخص‌های مناسب برای مناطق خشک و نیمه خشک برای سرزمین‌هایی با اقلیم مشابه ایران پرداخته خواهد شد. این مطالعه به درک بین رشته‌ای از عملکرد شاخص‌ها منجر می‌شود، و بر نقاط قوت و ضعف آنها تأکید می‌کند و در نهایت دستورالعمل‌های خاصی را برای غلبه بر این ضعف‌ها بیان می‌کند.

مواد و روش‌ها

به دلایل مختلف از جمله برداشت زیاد و نفوذ آلاینده‌ها به آب زیرزمینی مانند کود و سموم کشاورزی، فاضلاب‌های شهری، کیفیت و کمیت این آب‌ها افت می‌کند. برای سیاستگذاریهای آتی ملی و منطقه‌ای نیاز به ارزیابی پایداری آبخوان‌ها است لذا صرفا دانستن افت کیفیت و کمیت کافی نیست. باید به صورت دقیق متغیرهای تاثیرگذار شناسایی شود تا بتوان سریعترین و کم هزینه ترین راه حل ممکن را ارائه نمود.

مطالعه وضعیت آب‌های زیرزمینی به لحاظ پایداری موجب مطالعه دقیقتر این منابع ارزشمند و امکان سیاستگذاری صحیح برای استفاده امروز و آینده می‌گردد.

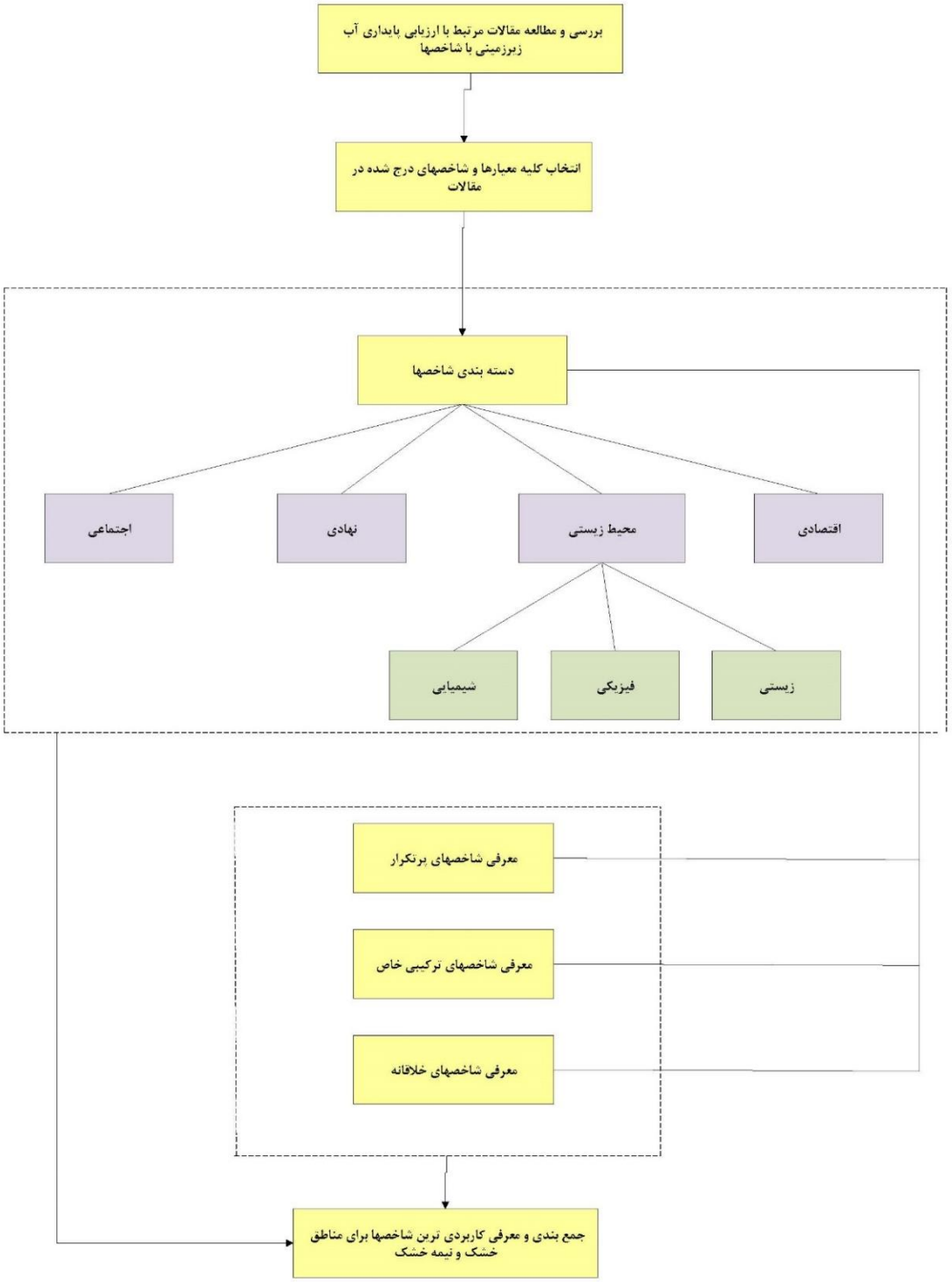
به این منظور Canadian Council of Ministers of the Environment در سال ۲۰۱۷ دستورالعملی به نام GSAA یا Groundwater Sustainability Assessment Approach: guideline for application منتشر نموده است. این دستورالعمل پنج هدف اصلی را دنبال می‌کند که عبارتند از:

۱. حفاظت از منابع آب زیرزمینی در برابر کاهش (کمیت آب زیرزمینی)
۲. حفاظت از کیفیت آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی (کیفیت آب‌های زیرزمینی)
۳. حفاظت از زنده ماندن اکوسیستم (اکوسیستم)
۴. دستیابی به رفاه اقتصادی و اجتماعی (اجتماعی اقتصادی)
۵. کاربرد حکمرانی خوب (Gordon, 2017)

در این راستا در پژوهش حاضر شاخص‌های در بردارنده موارد فوق مطالعه و دسته بندی شده است. شاخص‌های مرتبط با ردیفهای اول تا سوم در گروه شاخص‌های محیط زیستی قرار داده شد. ردیف چهارم به دو دسته شاخص اقتصادی و اجتماعی تفکیک گردید هرچند این شاخص‌ها در برخی موارد مرز مشخص ندارند. همچنین برای ردیف پنجم شاخص‌های نهادی مد نظر قرار گرفتند.

این پژوهش، مطالعه‌ای بر مقالات و پروژه‌های گذشته در زمینه ارزیابی پایداری آب زیرزمینی با شاخص‌ها است. در این راستا مقالات پیشین و فعلی به همراه پروژه‌های انجام شده جهانی و دستاوردهای آنها مطالعه گردید و شاخص‌های مختلف

به کار رفته در مطالعه جمع آوری گردید. شاخص‌ها در این پژوهش به چند روش دسته بندی شدند. دسته بندی اولیه آنها براساس گروه‌های اقتصادی، محیط زیستی، نهادی و اجتماعی بود که بخش محیط زیستی خود شامل سه زیر بخش زیستی، فیزیکی و شیمیایی است. همچنین بخشهایی ازین مطالعه به شاخص‌های پرتکرار در مطالعات، شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های خلاقانه و متفاوت اختصاص یافته است. روش کار این تحقیق در شکل (۱) قابل مشاهده است.



شکل۱. روش شناسی پژوهش

شاخص‌های پرتکراری که معرفی می‌شود معمولا در مطالعات کلیه آبخوان‌ها کاربرد دارند. اما شاخص‌های ترکیبی و شاخص‌های خلاقانه به این منظور انتخاب شده اند که به نظر می‌رسد برای وضعیت کشورهای غرب آسیا مناسب باشند زیرا این منطقه از گذشته دور محل کشاورزی بوده است و وابستگی به آب زیرزمینی داشته است ضمن اینکه حاوی فرهنگهای مختلف است و وضعیت جامعه شناختی متنوعی نیز دارد. همچنین این شاخص‌ها در مطالعاتی به کار رفته است که منطقه مورد مطالعه در مناطق خشک یا نیمه خشک جهان واقع شده است.

نتایج و بحث

پس از بررسی و مطالعه مقالات متعدد در زمینه ارزیابی پایداری آب زیرزمینی تعداد ۳۳ معیار و ۱۰۵ شاخص جمع آوری گردید. که به دسته‌های اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی و نهادی تقسیم بندی شد. کلیه شاخص‌ها و معیارها در پیوست (۱) درج شده است. براساس تعداد شاخص‌ها، هر دسته شامل این تعداد شاخص به شرح جدول زیر است:

جدول۱. تعداد شاخص‌ها بر اساس چهار دسته بندی اصلی

شاخص‌های اقتصادی	شاخص‌های محیط زیستی	شاخص‌های نهادی	شاخص‌های اجتماعی
۱۸	۶۶	۷	۱۴

شاخص‌های محیط زیستی به سه زیر گروه فیزیکی، شیمیایی و زیستی تقسیم می‌شوند که به شرح زیر است:

جدول۲. دسته بندی شاخص‌های محیط زیستی

شاخص‌های فیزیکی	شاخص‌های شیمیایی	شاخص‌های زیستی
۳۸	۲۳	۵

با توجه به تعداد بالای شاخص‌ها، صرفا به درج معیارها و تعداد شاخص‌های زیرمجموعه آنها در این مقاله اکتفا می‌گردد سپس به دسته بندی شاخص‌ها و شرح اهم آنها پرداخته می‌شود. در نهایت شاخص‌های کاربردی برای مناطق خشک و نیمه خشک مشابه کشورهای غرب آسیا نیز معرفی می‌گردد.

در جدول ۳ معیارهای در بردارنده این ۱۰۵ شاخص به همراه تعداد و نوع شاخص‌های زیرمجموعه آنها معرفی می‌گردد.

جدول۳. معرفی معیارها و تعداد شاخص‌های هر کدام

ردیف	معیار	تعداد کل شاخص‌های زیرمجموعه معیار	تعداد شاخص‌های محیط زیستی	تعداد شاخص‌های اجتماعی	تعداد شاخص‌های اقتصادی	تعداد شاخص‌های نهادی
۱	در دسترس بودن زیرساخت مرتبط با آب زیرزمینی اعم از استخراج و تصفیه و انتقال	۳	۰	۰	۳	۰
۲	رقابت برای دسترسی به آب زیرزمینی	۸	۷	۱	۰	۰
۳	اقتصاد آب زیرزمینی	۵	۰	۰	۵	۰
۴	حیات اکوسیستم	۱	۱	۰	۰	۰
۵	افت آب زیرزمینی	۱	۱	۰	۰	۰
۶	استفاده از آب زیرزمینی برای کشاورزی در منطقه مورد مطالعه	۷	۲	۴	۰	۱
۷	استفاده از آب زیرزمینی برای کشاورزی و صنعت در منطقه مورد مطالعه	۱	۰	۰	۱	۰
۸	نظارت بر آب زیرزمینی	۱	۰	۰	۰	۱
۹	برداشت از آب زیرزمینی	۲	۲	۰	۰	۰
۱۰	استفاده از آب زیرزمینی برای شرب	۱	۱	۰	۰	۰
۱۱	کیفیت منابع آب زیرزمینی	۱۷	۱۷	۰	۰	۰
۱۲	کمیت منابع آب زیرزمینی	۱۸	۱۸	۰	۰	۰
۱۳	نیاز به تصفیه آب زیرزمینی	۲	۲	۰	۰	۰
۱۴	آسیب پذیری آب زیرزمینی	۳	۳	۰	۰	۰
۱۵	توسعه انسانی	۱	۰	۰	۱	۰
۱۶	سلامت انسانی	۴	۰	۳	۱	۰
۱۷	ترکیبات هیدروکربنی در آب زیرزمینی	۱	۱	۰	۰	۰
۱۸	اثر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی	۱	۱	۰	۰	۰
۱۹	مسوولیتهای نهادی	۶	۰	۲	۰	۴
۲۰	تولید و انتشار دانش	۳	۰	۲	۱	۰
۲۱	فرونشست زمین	۱	۱	۰	۰	۰
۲۲	چارچوب قانونی	۲	۰	۱	۰	۱

ردیف	معیار	تعداد کل شاخص‌های زیرمجموعه معیار	تعداد شاخص‌های محیط زیستی	تعداد شاخص‌های اجتماعی	تعداد شاخص‌های اقتصادی	تعداد شاخص‌های نهادی
۲۳	وجود فلزات در آب زیرزمینی	۵	۵	۰	۰	۰
۲۴	کمیت منابع آب زیرزمینی تجدیدناپذیر	۱	۱	۰	۰	۰
۲۵	تعداد سایتهای آلوده	۱	۱	۰	۰	۰
۲۶	چگالی جمعیت	۱	۰	۱	۰	۰
۲۷	رشد جمعیت	۱	۰	۱	۰	۰
۲۸	قیمت آب زیرزمینی	۱	۰	۰	۱	۰
۲۹	مشارکت عمومی	۲	۰	۲	۰	۰
۳۰	کمیت منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر	۱	۱	۰	۰	۰
۳۱	بهره‌وری آب	۱	۰	۰	۱	۰
۳۲	شغل افراد مرتبط با آب زیرزمینی	۱	۰	۱	۰	۰
۳۳	سطح ایستابی	۱	۱	۰	۰	۰

مشاهده می‌شود که ۱۸ معیار فقط یک شاخص دارند و باقی معیارها دارای بیش از یک شاخص هستند. همچنین از ۱۵ معیار دیگر، ۶ معیار صرفا شامل یک نوع شاخص نیست. به عنوان مثال معیار ۲۲ یا چارچوب قانونی، دارای دو عدد شاخص است که یکی از نوع اجتماعی و دیگری از نوع نهادی است.

شاخص‌های محیط زیستی

تعداد شاخص‌های محیط زیستی یافت شده در مطالعات ۶۶ عدد بوده است که از میان آنها ۵ مورد زیستی، ۲۳ مورد شیمیایی و ۳۸ مورد فیزیکی محسوب شده است. لازم به ذکر است که شاخص‌های محیط زیستی در طیف ۱۷ عدد از معیارها گسترده شده است. همچنین تمام شاخص‌های زیرمجموعه معیارهای ردیفهای ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۷، ۱۸، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۳۰ و ۳۳ در جدول ۳ محیط زیستی محسوب می‌شوند.

در پژوهشی که برای آب‌های سطحی و زیرزمینی از طرف Pires انجام شد، از مجموع ۱۷۰ شاخص، ۵۸ درصد آنها به بخش محیط زیستی اختصاص داشتند که بالاترین نتیجه را بین دسته بندی‌ها داشتند این مساله اهمیت موضوع محیط زیست در امر ارزیابی پایداری را مشخص می‌کند (Pires, Morato et al. 2017).

از شاخص‌های مهم محیط زیستی که در بخش فیزیکی دسته بندی می‌شود می‌توان شاخص تنش آب زیرزمینی[۱۰] را نام برد. این شاخص تنش، برای اولین بار از طریق نسبت ردپای آب زیرزمینی به سطح واقعی آبخوان تعریف شده است (Samani 2021). از این شاخص به طرق مختلفی در مطالعات استفاده شده است به عنوان مثال Akbar و همکاران در سال ۲۰۲۲ این شاخص را با ترکیب دو شاخص موجود از خانواده ردپای آب زیرزمینی برای به دست آوردن نتایج واقعی‌تر پیشنهاد کردند که یکی به کمیت و کیفیت آب زیرزمینی می‌پردازد و دیگری فقط با کمیت می‌پردازد. با ترکیب این دو شاخص کاستی‌های شاخص اولیه به حداقل رسانده می‌شود.

شاخص‌های اجتماعی

در خصوص شاخص‌های اجتماعی تعداد زیادی از شاخص‌های مختلف، از فیزیکی و زیست اجتماعی گرفته تا روانی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و فرهنگی باید مورد مطالعه قرار گیرد. چندین شاخص ترکیبی کیفیت زندگی در سال‌های گذشته ساخته شده است، مانند شاخص توسعه انسانی[۱۱]، شادی ناخالص ملی[۱۲]، شاخص کیفیت زندگی[۱۳]، و شاخص رفاه و پیشرفت[۱۴](Pissourios 2013) .

تعداد شاخص‌های اجتماعی در این مطالعه ۱۴ مورد بوده است که زیرمجموعه ۹ معیار ردیفهای ۲، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۶، ۲۷، ۲۹ و ۳۲ از جدول ۳ قرار دارند.

شاخص‌های اجتماعی بسیار پراکنده و وابسته به منطقه مورد مطالعه هستند. هرچند تعداد آنها محدود است اما گستردگی خاصی دارند مثلا شاخصی مانند رشد جمعیت در همه مناطقی که آبخوان مورد استفاده انسان هست کاربرد دارد اما شاخصی مانند تغییر در سطح تحصیلات جامعه کاربر آبخوان بستگی به درجه توسعه یافتگی هر کشور قابل تعریف و امتیازآوری است. لازم به ذکر است که یکی از شاخص‌های مهم در بخش اجتماعی، شاخص فقر آبی است که به تفصیل در بندی جداگانه زیرمجموعه شاخص‌های ترکیبی، توضیح داده شده است. شاخص دیگر در بخش شاخص‌های اجتماعی شاخص آموزش یا درصد افراد آموزش دیده و توانمند است که نشان دهنده توانمندی جامعه در مدیریت منابع آب شیرین است برای محاسبه امتیاز این شاخص، درصد افراد آموزش دیده و توانمند شده محاسبه شده و براساس نوع آموزش و نظر کارشناس امتیاز داده می‌شود (Pandey et al. 2011).

شاخص‌های اقتصادی

در این مطالعه ۱۸ شاخص اقتصادی طبقه بندی شده است که زیرمجموعه ۹ معیار است که عبارتند از: ۱، ۳، ۶،۷، ۱۵، ۱۶، ۲۰، ۲۸ و ۳۱ در جدول ۳.

شاخص‌های اقتصادی هرچند محدود به ۱۸ عدد شده اند اما ماهیتی گسترده دارند. به عنوان مثال قیمت آبی که در دسترس مصرف کننده قرار میگیرد چه برای شرب و چه کشاورزی یک شاخص است اما شاخص دیگری که بسیار نیز مطرح است و به ویژه برای کشورهای خشک و نیمه خشک معنا پیدا می‌کند شاخص بهره‌وری آب است که به صورت بهره‌وری آب برای کشاورزی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب آب تعریف می‌گردد(Uddin et al. 2021) .

با توجه به اینکه یکی از مشکلات در مدیریت آب در ایران ناسازگاری برنامه‌ها و سیاست‌ها است. برخی از عناصر طرح پایداری آبخوان با سیاست‌های خودکفایی غذایی در ایران ناسازگار است. مشکلات اشتغال مبتنی بر آب و معیشت پس از تغییر در معیارهای بهره‌وری کشاورزی به وجود آمده است. برای مقابله با این مشکل باید تولید در هر هکتار جایگزین تولید در واحد آب مصرفی شود (Samani 2021). لذا به نظر می‌رسد این شاخص کاربرد معتنابهی در مناطق خشک و نیمه خشک داشته باشد.

شاخص‌های نهادی

شاخص‌های نهادی هفت مورد است که زیرمجموعه معیارهای ۶، ۸، ۱۹ و ۲۲ جدول هستند. این شاخص‌ها کمترین تعداد را در بین شاخص‌های مورد مطالعه دارند اما چون مرتبط با قانون و نظارت بر چاه‌ها است از اهمیت به سزایی برخوردار است. لازم به ذکر است در کلیه مطالعات و مقالات انجام شده، شاخص‌های نهادی کمترین تعداد را داشته اند که شاید بتوان از این زاویه در این خصوص اعلام نظر نمود که این شاخص‌ها مرتبط با حکمرانی هستند و با توجه به اینکه رویکرد توسعه یافتگی کاهش تمرکز مدیریت از بالا به پایین است، شاخص‌های نهادی تعدد کمتری دارند و تمرکز بر سایر شاخص‌ها قرار گرفته است. به عنوان مثال شاخص چگالی چاه‌های مشاهده‌ای که از تقسیم تعداد چاه‌ها بر مساحت آبخوان حاصل می‌گردد (Zarei et al. 2022), (Hosseini et al. 2019) زیرمجموعه شاخص‌های نهادی لحاظ گردیده.

از دیگر شاخص‌های نهادی، شاخص امتیاز پایه ظرفیت سازمانی[15] است و نحوه امتیازدهی به این شاخص بر اساس قوانین مدیریت آب و تشخیص کارشناسی است (Samani. 2021).

معرفی پرتکرارترین شاخص‌ها

شاخص کل برداشت آب زیرزمینی نسبت به تغذیه[16]

یکی از پرتکرارترین شاخص‌های در مطالعات مختلف شاخص کل برداشت آب زیرزمینی نسبت به تغذیه بوده است،که حداقل در هفت مرجع مختلف استفاده شده است. این شاخص از نوع محیط زیستی فیزیکی و زیرمجموعه معیار ۹ در جدول مورد نظر است.

تغذیه آب زیرزمینی را می‌توان به معنای گسترده به عنوان «افزودن آب به مخزن آب زیرزمینی» تعریف کرد. برای ساخت شاخص تغذیه آب زیرزمینی، از تغذیه طبیعی با جریان رو به پایین آب در منطقه غیراشباع استفاده شده است که به طور کلی مهم ترین حالت تغذیه در مناطق خشک و نیمه خشک است. برداشت کل از آب‌های زیرزمینی به معنای برداشت کامل آب از یک سفره معین توسط چاه ها، گمانه ها، چشمه‌ها و راه‌های دیگر به منظور تامین آب شرب و کشاورزی و صنعت می‌باشد. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{\Sigma Ab}{\Sigma R} * 100$$

ΣAb = کل برداشت آب از آبخوان

ΣR = کل تغذیه آب به آبخوان

این شاخص در مراجع مختلفی به کار برده شده است اما در بین سالهای ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ در مراجع زیر قابل مشاهده است:

(Vrba 2007) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Gordon 2017) (Hosseini, Parizi et al. 2019) (Bui, Kawamura et al. 2019) (Samani 2021) (Majidipour, Najafi et al. 2021)

شاخص نسبت کل برداشت به کل منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری

شاخص پرکاربرد بعدی شاخص نسبت کل برداشت به کل منابع آب زیرزمینی قابل بهره برداری است که دست کم در ۶ مرجع مختلف بیان شده است. این شاخص از نوع محیط زیستی فیزیکی و زیرمجموعه معیار ۹ در جدول ۳ می‌باشد. برداشت کل از آب‌های زیرزمینی به معنای برداشت کل آب از یک سفره زیرزمینی توسط چاه ها، گمانه‌ها و سایر راه‌های مصنوعی به منظور تامین نیاز آبی در بخش‌های مختلف مصارف می‌باشد. منظور از منابع آب زیرزمینی قابل بهره برداری، مقدار آبی است که می‌توان از یک سفره زیرزمینی تحت محدودیت‌های اجتماعی-اقتصادی فعلی و شرایط هیدروژئولوژیکی و اکولوژیکی برداشت کرد. برداشت کل از آب‌های زیرزمینی با استفاده از تمام منابع اطلاعاتی موجود (آب کنتورها، مصرف برق برای برداشت آب، انواع پمپ‌های مورد استفاده برای برداشت و سایر موارد) تعیین می‌شود.

نحوه محاسبه این شاخص به صورت زیر است:

$I = \frac{\Sigma Ab}{\Sigma E} * 100$

ΣAb = کل برداشت آب از آبخوان

ΣR = منابع آب زیرزمینی قابل بهره برداری

این شاخص نیز در مراجع مختلفی به کار برده شده است اما در بین سالهای ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۱ در مراجع زیر قابل مشاهده است:

(Vrba 2007) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Gordon 2017) (Hosseini, Parizi et al. 2019) (Bui, Kawamura et al. 2019) (Samani 2021)

شاخص‌های ترکیبی

شاخص DRASTIC

از معروفترین شاخص‌های ترکیبی، شاخص‌های مرتبط با سنجش آسیب پذیری است که زیرمجموعه پایداری محسوب می‌گردد.

آسیب پذیری تنها به عنوان تابعی از عوامل هیدروژئولوژیکی - ویژگی‌های آبخوان و مواد زمین شناسی غیراشباع روی آن و خاک تعریف می‌شود. متغیرهای اصلی مورد استفاده در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی عبارتند از: تغذیه، خواص خاک و منطقه غیراشباع، سطح آب زیرزمینی و هدایت هیدرولیکی منطقه اشباع.

در چند دهه گذشته، مطالعات آسیب پذیری به طور تصاعدی در سراسر جهان افزایش یافته است. در مطالعه‌ای مروری که در جهت بررسی آسیب پذیری آب زیرزمینی در سال ۲۰۲۲ انجام شده است مجموع ۹۴۹ مقاله توسط پژوهشگران بررسی شده است. براساس تجزیه و تحلیل تحقیق مورد نظر، به وضوح روند تکاملی آسیب پذیری آب زیرزمینی مشاهده شد، و همچنین چهار محدوده تحقیقاتی (توسعه مدل، اصلاح و بهینه‌سازی، اثرات تغییرات آب و هوا، اثرات فعالیت انسانی و مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی) شناسایی گردید. چالش‌های آینده از دید این پژوهشگران در زمینه آسیب پذیری آب زیرزمینی عبارتند از: توسعه تحقیقات نابرابر، همکاری ناکافی، پاسخ به تغییرات آب و هوا و فعالیت‌های انسانی، و اهداف توسعه پایدار در مدیریت آب‌های زیرزمینی(Xiong et al. 2022).

برای سنجش آسیب پذیری از شاخص‌های متعددی استفاده می‌گردد که یکی از قدیمیترین این شاخص‌ها DRASTIC است:

شاخص DRASTIC با استفاده از هفت عامل عمق (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه وادوز (I) و هیدرولیک اعمال شد. رسانایی (C). مناطق با آسیب پذیری بالا و ناپایداری آب‌های زیرزمینی می‌توانند بسیار قابل توجه باشند.

DRASTIC index (vulnerability rating) = Dr Dw+ RrRw + ArAw + SrSw + TTw+ Ir Iw + Cr Cw

که در آن w وزن و r رتبه است. این هفت پارامتر براساس اهمیت اثرشان از ۱ تا ۵ وزن دهی می‌شوند. در نهایت شاخص عددی آسیب پذیری براساس تجمیع نتایج حاصل از ارزیابی عددی پارامترها و وزن هر یک محاسبه می‌گردد. (Maria Commission 2008),(2018).

از شاخص‌های دیگر برای سنجش آسیب پذیری می‌توان به شاخص GOD[17] (Rukmana et al. 2020) و شاخص AVI [18] (Ducci, & Sellerino 2022) اشاره نمود که صرفا به عنوان آنها در این پژوهش اشاره می‌شود و جزئیات محاسبه ارائه نمی‌گردد.

شاخص فقر آبی [19]

یکی از شاخص‌های ترکیبی مهم که نه فقط در بحث آب زیرزمینی بلکه درباره مطالعه آب سطحی نیز استفاده می‌شود ، شاخص فقر آبی است. این شاخص زیرمجموعه معیار رقابت و شاخصی اجتماعی معرفی شده است.

مشخص است که خانوارهای فقیر اغلب از تامین آب ضعیف رنج می‌برند و این منجر به از دست دادن قابل توجه زمان و تلاش، به ویژه برای زنان می‌شود. با پیوند دادن علوم فیزیکی و اجتماعی برای پرداختن به این موضوع، ممکن است راه حل عادلانه تری برای تخصیص آب پیدا شود. این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$WPI = wa * A + ws * S + wt * (100 - T)$$

A: ارزیابی در دسترس بودن آب تنظیم شده (AWA) به عنوان درصد. محاسبه شده بر اساس در دسترس بودن آب‌های زیرزمینی و سطحی مربوط به نیازهای آب زیست محیطی و نیازهای اولیه انسانی، به علاوه سایر نیازهای داخلی، و همچنین تقاضای کشاورزی و صنعت. (مقدار A باید تغییر فصلی در دسترس بودن آب را نیز تشخیص دهد.)

S: جمعیت با توانایی دسترسی به آب سالم و بهداشت (٪).

T: شاخص (به عنوان مثال، بین ۰ تا ۱۰۰) برای نشان دادن زمان و تلاش صرف شده برای جمع آوری آب برای خانواده

wa، ws و wt وزن هایی هستند که به هر جزء شاخص داده می‌شود (به طوری که $wa + ws + wt = 1$) (Ladi, Mahmoudpour and Sharifi 2021).

این شاخص به عنوان زیرمجموعه‌ای از معیار رقابت آبی مطرح شده است که به ویژه در سرزمین‌های خشک و نیمه خشک مانند بخشهای قابل توجهی از کشورهای غرب آسیا شاخص مهمی برای سنجش میزان فقر ناشی از کمبود آب مطرح است. به عبارتی این شاخص، آب و فقر را به هم پیوند می‌دهد(Sadeghi et al., 2020).

لازم به ذکر است که شاخص‌های ترکیبی مانند موارد نامبرده کاربردی گسترده در علم ارزیابی دارند و به وفور در

تحقیقات مختلف از آنها استفاده شده است اما انتقادهایی نیز بر کاربرد آنها وارد شده است. به عنوان مثال گفته می‌شود ایجاد شاخص‌های ترکیبی به معنای از دست دادن مقدار معینی از اطلاعات و تولید نتایجی است که شفافیت کمتری دارند، زیرا به نوعی یک بعدی بودن را دوباره معرفی می‌کنند (Pissourios 2013). به عبارت دیگر شاخص ترکیبی مجموعی از انواع شاخص‌ها است که شاید در برخی موارد بهتر باشد که تک تک با یکدیگر مقایسه و تحلیل گردند و ترکیب آنها با یکدیگر سبب از دست دادن پاره‌ای از اطلاعات می‌گردد.

شاخص‌های خلاقانه

منظور از شاخص‌های خلاقانه شاخص‌هایی است که صرفا در یک مطالعه دیده شده و براساس نظرات پژوهشگران در یک مطالعه موردی خاص شکل گرفته است. تعداد این شاخص‌ها بسیار بیشتر از دو مورد بوده اما شاخص‌های زیر با توجه به ماهیت کاربردی آنها برای مناطق خشک و نیمه خشک و همچنین تمرکز آنها بر حضور همه ذینفعان، در ارزیابی انتخاب شده اند. برای تدوین و محاسبه این شاخص‌ها از توزیع پرسشنامه در بین افراد مختلفی از جمله مصرف کنندگان آب و مسوولان سازمان‌های مختلف کمک گرفته شده است.

شاخص ظرفیت نهادی یا تراکم تکثیر نهادی و اداری یا کشاورزی[۲۰]

یکی از شاخص‌های خلق شده به وسیله پژوهشگران محیط زیست «ظرفیت نهادی یا تراکم تکثیر نهادی و اداری یا کشاورزی» بوده است. این شاخص برای براورد تراکم تکثیر نهادی و اداری یا کشاورزی تدوین شده است و شاخصی اجتماعی از زیرمجموعه مسوولیت نهادی است.

این شاخص نه تنها برای بررسی مقررات دولتی به کار برده می‌شود، بلکه روش‌های اجرای مقررات، سازوکارهای آموزش عمومی، و کمک‌های عمومی برای جامعه تحت نظارت (به عنوان مثال، کشاورزان) را در مواردی که رعایت و اجرا می‌گردد، تعیین می‌کند(Majidipour, Najafi et al. 2021) . لذا برای جوامع کشاورزی که وابسته به آب زیرزمینی هستند مانند ایران کاربردی به نظر می‌رسد.

مدل AHP از موقعیت جغرافیایی نهادها و سازمان‌های مرتبط با مدیریت آبهای زیرزمینی به عنوان شاخصی برای ارزیابی این شاخص در منطقه مورد مطالعه استفاده می‌کند. لازم به ذکر است سازمان‌های ذیربط برای مساله آب زیرمینی در ایران عبارتند از وزارت نیرو به عنوان مدیر اصلی منابع آب، وزارت کشاورزی به عنوان عمده ترین مصرف کننده آب، سازمان حفاظت از محیط زیست به عنوان مسوول دیگری برای مدیریت منابع آبی و حفاظت از اکوسیستمهای وابسته به آب معرفی می‌شود. همچنین شرکت‌های آب منطقه‌ای نیز نقش بسزایی در حفاظت از منابع آب دارند. رابطه پیشنهادی برای محاسبه آن به صورت زیر است:

شاخص = (دانسیته محاسبه شده / دانسیته مورد نیاز تخمین زده شده) × ۱۰۰

دبی متر حجمی نصب شده[۲۱]

شاخص دیگر دبی متر حجمی نصب شده می‌باشد که شاخصی اجتماعی زیرمجموعه معیار مشارکت عمومی لحاظ شده است.

مقررات آب‌های زیرزمینی، نهادهای تصمیم گیری و مدیریت منابع آب زیرزمینی زمانی می‌توانند موثر و کارآمد باشند که از طرف ذینفعان پذیرفته شوند. هرگونه تغییر در مدیریت منابع آب زیرزمینی باید توسط نهادهای رسمی برنامه‌ریزی شود، توسط سازمان‌های عامل در جامعه موردمطالعه اعمال شود و توسط ذینفعان از جمله مصرف‌کنندگان پذیرفته شود. این پذیرش از طریق شاخص دبیمتر حجمی نصب شده حاصل می‌شود.

مبنای تدوین این شاخص نیز استفاده از پرسشنامه و استفاده از روش درونیابی یا IDW۲۲ بوده است. درون‌یابی روشی است برای یافتن مقدار تابع درون یک بازه، زمانی که مقدار تابع در تعدادی از نقاط گسسته معلوم است.

در این مرجع مفهوم این شاخص به مشارکت مصرف کنندگان و ذینفعان آب زیرزمینی مانند کشاورزان، صنعت، شرکت‌های آب، تعاونی‌های محلی که زندگی آنها مستقیماً تحت تأثیر کمبود آب زیرزمینی و هرگونه تغییر در تصمیمات یا اصلاح مقررات آب زیرزمینی است، اشاره دارد. لازم به ذکر است که گروه هایی که اثرات اقتصادی را تجربه نمی کنند جزء این دسته نیستند. آگاهی مصرف کنندگان می‌تواند به مشارکت آنها در برنامه‌های مدیریت و احیای آبخوان و همچنین کنترل آنها بر استفاده از آب‌های زیرزمینی کمک کند. در این شرایط مشارکت با استفاده از پرسشنامه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اما در مدل AHP، نقشه موقعیت چاه هایی که دارای دبی سنجهای حجمی نصب شده اند، به عنوان معیار شاخص در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد.

براساس درون یابی IDW می‌توان آن را به ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ تقسیم کرد(Majidipour, Najafi et al. 2021) .

نتیجه‌گیری

ارزیابی پایداری آبخوان‌ها با توجه به وابستگی روزافزون بشر به آنها امری مهم و اجتناب ناپذیر است. در این راستا شاخص‌ها

ابزارهای مهم و کارایی برای بررسی وضعیت فعلی و پیش بینی چگونگی پایداری سیستم‌های مختلف از جمله آب زیرزمینی هستند. هدف از این مطالعه شناسایی شاخص‌های مرتبط با پایداری آب زیرزمینی، دسته بندی آنها و شناسایی کمبود یا ضعف در طبقه بندیهای مختلف بوده است. برای متخصصانی که در زمینه آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک مطالعه و برنامه ریزی می‌کنند، پیشنهاد می‌شود از شاخص‌های پرتکرار در برنامه ریزی خود استفاده نمایند. همچنین مطالعه و محاسبه شاخص‌های ترکیبی به ویژه در زمینه آسیب پذیری آبخوان نقش بسزایی در مدیریت آبخوان‌ها دارد. همچنین در بعضی از مواقع، آبخوان‌های خاص نیاز به استفاده از شاخص‌های خاصی دارند به عنوان مثال در مناطق نفتخیز که به خصوص در مناطق غرب آسیا وسعت دارد، استفاده از شاخصی که غلظت هیدروکربنها را در آبخوان نشان می‌دهد معنادار خواهد بود. به عبارت دیگر مطالعه هر آبخوان وابسته به کاربری اراضی اطراف یا بالای آن دارد به طور مثال آبخوان‌هایی با اراضی مورد استفاده برای کشاورزی نیاز به محاسبه شاخص‌های خاص کشاورزی مانند غلظت سموم دفع آفات و کودها در آب زیرزمینی منطقه هستند.

با توجه به خاص بودن شرایط اجتماعی در هر منطقه، تدوین شاخص‌های اجتماعی خاص و خلاقانه در زمینه‌های اجتماعی کاربرد خاصی داشته باشد. یکی از نکات بسیار مهم در ارزیابی پایداری آب زیرزمینی و رفع مشکلات موجود در این زمینه حضور همه ذینفعان در مدیریت آبخوان‌ها است. یکی از دلایل موفق نبودن طرحهای مدیریت آب زیرزمینی در ایران لحاظ نکردن همه ذینفعان در این موضوع است.

بدیهی است برای این منظور اولا باید نگرش مدیریت از بالا به پایین برداشته شود ثانیا تمرکز بر شاخص‌های ویژه اجتماعی هر منطقه راهگشا خواهد بود. لازم به ذکر است برای کشوری با وسعت و تنوع ایران نمی‌توان به صورت یکدست و یکنواخت شاخص‌های اجتماعی در نظر گرفت و هر منطقه آن نیاز به مطالعه خاص خود دارد. براساس جدول ۱ در تحقیق حاضر مشاهده می‌شود ۱۴ مورد از ۱۰۵ مورد شاخص، در بردارنده شاخص‌های اجتماعی بوده است. با توجه به تنوع جوامع انسانی در جهان لزوما نمی‌توان از شاخص‌های مشابه استفاده نمود. یا در صورت استفاده از شاخص مشابه نمی‌توان وزن مشابه برای آن در مناطق مختلف در نظر گرفت. لذا برای ارزیابی پایداری آبخوان در هر منطقه لازم است از جامعه شناسان نیز یاری گرفته شود و مطالعه محدود به دید مهندسی یا محیط زیستی و یا حتی اقتصادی نباشد.

با توجه به اینکه ارزیابی پایداری علمی جدید محسوب می‌گردد، توسعه شاخص‌های پایداری نیز فرایندی پویا و رو به رشد است لذا این مطالعه نتیجه ارزیابی‌های فعلی است و در آینده شاخص‌های جدیدتری نیز به کار گرفته خواهد شد.

Reference:

Ahmed, S. I., Sonkar, A. K., Kishore, N., Varshney, R., & Jhariya, D. (2022). Hydrogeochemical Characterization and Qualitative Assessment of Groundwater in Jampali Coal Mining Area, Chhattisgarh, India. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 103(4), 1109-1125.

Akbar, H., Nilsalab, P., Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2022). Comprehensive review of groundwater scarcity, stress and sustainability index-based assessment. Groundwater for Sustainable Development, 18, 100782.

Besser, H. and L. Dhaouadi (2022). "An overview of groundwater resources evolution in North Africa: sustainability assessment of the CI aquifer under natural and anthropogenic constraints." Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications 10.

Bui, N. T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du BUI, D., & Truong, N. T. (2016). Environmental sustainability assessment of groundwater resources in Hanoi, Vietnam by a simple AHP approach. 土木学会論文集 G (環境), 72(5), I_137-I_146.

Bui, N. T., Kawamura, A., Amaguchi, H., Du Bui, D., Truong, N. T., & Nakagawa, K. (2018). Social sustainability assessment of groundwater resources: A case study of Hanoi, Vietnam. Ecological indicators, 93, 1034-1042.

Bui, N. T., Kawamura, A., Du Bui, D., Amaguchi, H., Bui, D. D., Truong, N. T.,... & Nguyen, C. T. (2019). Groundwater sustainability assessment framework: A demonstration of environmental sustainability index for Hanoi, Vietnam. Journal of environmental management, 241, 479-487.

Ducci, D., & Sellerino, M. (2022). A modified AVI model for groundwater vulnerability mapping: Case studies in Southern Italy. Water, 14(2), 248

Duran-Llacer, I., Arumí, J. L., Arriagada, L., Aguayo, M., Rojas, O., González-Rodríguez, L.,... & Singh, S. K. (2022). A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments: A case study in Chile. Science of The Total Environment, 816, 151528.

Fabian, C. L., Ibañez, J. W., Prieto, F. S., & Camargo, C. C. (2018). Groundwater Sustainability Assessment in Small Islands: the case study of san andres in the caribbean sea.

Fahim, A. K. F., Kamal, A. M., & Shahid, S. (2023). Spatiotemporal change in groundwater sustainability of Bangladesh and its major causes. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 37(2), 665-680.

Fang, Z., X. Ding and H. Gao (2022). "Local-Scale Groundwater Sustainability Assessment Based on the Response to Groundwater Mining (MGSI): A Case Study of Da'an City, Jilin Province, China." Sustainability 14(9): 5618.

Gordon, J. R. C.-E. (2008). Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide, OECD publishing.

Gordon, C. C. o. M. o. t. (2017). "GROUNDWATER SUSTAINABILITY ASSESSMENT APPROACH: GUIDANCE FOR APPLICATION."

Hosseini, S. M., Parizi, E., Ataie-Ashtiani, B., & Simmons, C. T. (2019). Assessment of sustainable groundwater resources management using integrated environmental index: Case studies across Iran. Science of the total environment, 676, 792-810.

Iddrisu, U. F., Mbatchou, V. C., Armah, E. K., & Amedorme, B. S. (2023). Groundwater quality assessment for sustainable irrigation in Nanton district, Ghana. Water Practice and Technology.

Ladi, T., A. Mahmoudpour and A. Sharifi (2021). "Assessing impacts of the water poverty index components on the human development index in Iran." Habitat International 113: 102375.

Mahdavi, T., & Hosseini, S. A. (2019). Aquifers Sustainability assessment by Integrated Groundwater Footprint Indicator Case Study: East Azerbaijan Province. Iran-Water Resources Research, 15(4), 438-452. [in Persian]

Majidipour, F., Najafi, S. M. B., Taheri, K., Fathollahi, J., & Missimer, T. M. (2021). Index-based groundwater sustainability assessment in the socio-economic context: a case study in the Western Iran. Environmental Management, 67, 648-666.

Maria, R. (2018, February). Comparative studies of groundwater vulnerability assessment. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 118, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.

Martinez, S., O. Escolero and M. Perevochtchikova (2015). "A comprehensive approach for the assessment of shared aquifers: the case of Mexico City." Sustainable Water Resources Management 1(2): 111-123.

Milewski, A., K. Lezzaik and R. Rotz (2020). "Sensitivity analysis of the groundwater risk index in the Middle East and North Africa region." Environmental Processes 7(1): 53-71.

Panahi, E., Bafkar, A., & Hafezparast, M. (2017). Assessment of management alternatives for maintaining watershed sustainability in the climate scenarios. Iran-Water Resources Research, 13(1), 139-152. [in Persian]

Pandey, V. P., Shrestha, S., Chapagain, S. K., & Kazama, F. (2011). A framework for measuring groundwater sustainability. Environmental Science & Policy, 14(4), 396-407.

Pires, A., Morato, J., Peixoto, H., Botero, V., Zuluaga, L., & Figueroa, A. (2017). Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management. Science of the total environment, 578, 139-147.

Pissourios, I. A. (2013). "An interdisciplinary study on indicators: A comparative review of quality-of-life, macroeconomic, environmental, welfare and sustainability indicators." Ecological indicators 34: 420-427.

Rashid, A., Ayub, M., Ullah, Z., Ali, A., Sardar, T., Iqbal, J.,... & Khan, S. (2023). Groundwater Quality, Health Risk Assessment, and Source Distribution of Heavy Metals Contamination around Chromite Mines: Application of GIS, Sustainable Groundwater Management, Geostatistics, PCAMLR, and PMF Receptor Model. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3), 2113.

Rukmana, B. T. S., Bargawa, W. S., & Cahyadi, T. A. (2020, March). Assessment of groundwater vulnerability using GOD method. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 477, No. 1, p. 012020). IOP Publishing

Sadeghi, S. Sadoddin, A. Asadi, O. Hazbavi, Z. Zare Karizi, A. Moayeri, M. (2020). “watershed Health and Sustainability (Principles, Approaches and Assessment Methods)”. Trbiat Modares University Press. pub.modares.ac.ir [in Persian]

Sadek, M. and K. Hagagg (2020). "A Novel Groundwater Sustainability Index using AHP/GIS Approach." International Journal of Research in Environmental Science (IJRES) 6(4): 28-40.

Samani, S. (2021). "Analyzing the groundwater resources sustainability management plan in Iran through comparative studies." Groundwater for Sustainable Development 12: 100521.

Samani, S. (2021). "Assessment of groundwater sustainability and management plan formulations through the integration of hydrogeological, environmental, social, economic and policy indices." Groundwater for Sustainable Development.

Singh, A. P. and P. Bhakar (2021). "Development of groundwater sustainability index: a case study of western arid region of Rajasthan, India." Environment, Development and Sustainability 23(2): 1844-1868.

Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. Ecological Indicators, 122, 107218.

Vrba, J. (2007). Groundwater Resources Sustainability Indicators.

Water, U. N. (2021). Progress on change in water-use efficiency: Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.4. 1, 2021. Food & Agriculture Org..

Xiong, H., Wang, Y., Guo, X., Han, J., Ma, C., & Zhang, X. (2022). Current status and future challenges of groundwater vulnerability assessment: A bibliometric analysis. Journal of Hydrology, 128694.

Zarei, B., Parizi, E., Hosseini, S. M., & Ataie-Ashtiani, B. (2022). A multifaceted quantitative index for sustainability assessment of groundwater management: application for aquifers around Iran. Water International, 47(3), 338-360.

Zhou, H., Dai, M., Wei, M., & Luo, Z. (2023). Quantitative Assessment of Shallow Groundwater Sustainability in North China Plain. Remote Sensing, 15(2), 474

یادداشت ها

[1] *reliability–resiliency–vulnerability (RRV)*
[2] *chromite mines*
[3] *Standardized Precipitation Index*
[4] *Normalized Difference Vegetation Index*
[5] *Geographical Information System*
[6] *Groundwater risk index*
[7] *Driving force – Pressure – State – Impact - Response*
[8] *groundwater sustainability infrastructure index*
[9] *Groundwater footprint*
[10] *groundwater stress indicator*
[11] *Human Development Index*
[12] *Gross National Happiness*
[13] *Quality-of-Life Index*
[14] *Well-being & Progress Index*
[15] *basic organizational capacity score index*
[16] *Total groundwater abstraction to recharge index*
[17] *groundwater assurance, overall lithology of aquifer or aquitard, depth to groundwater table*
[18] *Aquifer vulnerability Index*
[19] *Water Poverty Index*
[20] *Institutional capacity or the density of institutional and administrative or agricultural propagation*
[21] *Installed volumetric flow meter density*
[22] *inverse distance weighted interpolation*

پیوست

فهرست کلیه شاخص‌های جمع آوری شده

ردیف	معیار	شاخص	گروه	زیرگروه	مرجع
۱	در دسترس بودن زیر ساخت	منبع برای ارتقاء زیرساخت‌های آب (شبکه) یا وضعیت زیرساخت (شبکه) یا تلفات سیستم به صورت درصد برای هر دو سیستم زیرساخت آب شیرین و فاضلاب (شبکه)	اقتصادی		(Gordon 2017) (Singh and Bhakar 2021)
۲		مقدار پولی که برای برنامه ریزی و نگهداری زیرساخت‌ها در سال هزینه می‌شود	اقتصادی		(Gordon 2017)
۳		قابلیت اطمینان زیرساخت با تجزیه و تحلیل کل خرابی دوره‌های خدمات در روز در یک سال مشخص	اقتصادی		(Singh and Bhakar 2021)
۴	رقابت	تعداد پروژه‌های توسعه در حال اجرا	محیط زیستی	فیزیکی	(Gordon 2017)
۵		تعداد پروژه‌های عمرانی مصوب	محیط زیستی	فیزیکی	(Gordon 2017)
۶		تعداد گونه‌های بیگانه	محیط زیستی	زیستی	(Gordon 2017)
۷		تعداد گونه هایی که از آب‌های زیرزمینی تغذیه می‌کنند	محیط زیستی	زیستی	(Gordon 2017)
۸		تعداد گونه‌های در معرض خطر مرتبط با آب زیرزمینی	محیط زیستی	زیستی	(Gordon 2017)
۹		وجود یا عدم وجود گونه‌های حساس	محیط زیستی	زیستی	(Gordon 2017)
۱۰		درصد کل آب‌های زیرزمینی برای آب آشامیدنی	محیط زیستی	فیزیکی	(Gordon 2017)
۱۱		شاخص فقر آبی	اجتماعی		(Ladi, Mahmoudpour et al. 2021) (Damkjaer and Taylor 2017) (Sullivan 2002) (Pires, Morato et al. 2017)
۱۲	اقتصاد آب زیرزمینی	شاخص وابستگی جمعیت به آب‌های زیرزمینی	اقتصادی		(Gordon 2017) (Samani 2021)
۱۳		قیمت آب زیرزمینی بر اساس دلار در هر متر مکعب	اقتصادی		(Gordon 2017)

۱۴		کاهش فشار یا نسبت تخصیص بودجه برای کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی	اقتصادی	(Bui, Kawamura et al. 2019)
۱۵		شاخص مخارج مدیریت بر اساس پول صرف شده برای مدیریت آب و هزینه مدیریت آب	اقتصادی	(Samani 2021)
۱۶		شاخص مالی یا درآمد	اقتصادی	(Singh and Bhakar 2021)
۱۷	سلامت اکوسیستم	شاخص حیات آبزیان	محیط زیستی زیستی	(Singh and Bhakar 2021) (Simonetti, Frascareli et al. 2021)
۱۸	افت آب زیرزمینی	نسبت مساحت آبخوان با مشکل افت	محیط زیستی زیستی	(Vrba 2007) (Gordon 2017)
۱۹	آب زیرزمینی برای کشاورزی	وابستگی جمعیت کشاورزی به آب‌های زیرزمینی	اقتصادی	(Vrba 2007) (Gordon 2017)
۲۰		سطح زراعی در مطالعه موردی بر اساس هکتار	اقتصادی	(Gordon 2017)
۲۱		مقررات مربوط به تناوب زراعی	نهادی	(Gordon 2017)
۲۲		درصد سطح آبخوان مورد استفاده برای تولیدات کشاورزی	اقتصادی	(Gordon 2017)
۲۳		درصد سطح آبخوان آبیاری شده توسط منابع آب زیرزمینی	اقتصادی	(Pires, Morato et al. 2017) (Hosseini, Parizi et al. 2019)
۲۴		شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری	محیط زیستی فیزیکی	(Samani 2021)
۲۵		درصد اراضی تحت آبیاری متکی به آب‌های زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Pires, Morato et al. 2017)
۲۶	آب زیرزمینی برای کشاورزی و صنعت	درصد آب زیرزمینی مورد استفاده در بخش کشاورزی و صنعت	اقتصادی	(Zarei, Parizi et al. 2022)
۲۷	پایش آب زیرزمینی	تراکم چاه‌های مشاهده ای	نهادی	(Zarei, Parizi et al. 2022) (Hosseini, Parizi et al. 2019)
۲۸	برداشت از منابع آب زیرزمینی	نسبت برداشت آب زیرزمینی به شاخص تغذیه	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Gordon 2017) (Hosseini, Parizi et al. 2019) (Bui, Kawamura et al. 2019) (Samani 2021) (Majidipour, Najafi et al. 2021)
۲۹		شاخص نسبت کل برداشت به کل منابع آب زیرزمینی قابل بهره برداری	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Environment 2017) (Bui, Kawamura et al. 2019) (Hosseini, Parizi et al. 2019) (Samani 2021)
۳۰	آب زیرزمینی برای شرب	آب‌های زیرزمینی به عنوان درصدی از کل مصرف آب آشامیدنی	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Gordon 2017)
۳۱	کیفیت آب زیرزمینی	شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی بر اساس مشکلات آلودگی انسانی به عنوان هدایت الکتریکی	محیط زیستی شیمیایی	(Vrba 2007) (Pires, Morato et al. 2017) (Majidipour, Najafi et al. 2021)
۳۲		شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی بر اساس مشکلات آلودگی انسانی به عنوان نیترات	محیط زیستی شیمیایی	(Vrba 2007) (Pires, Morato et al. 2017) (Majidipour, Najafi et al. 2021)
۳۳		شاخص کیفیت منابع آب زیرزمینی بر اساس مشکلات آلودگی انسانی به عنوان کلرید	محیط زیستی شیمیایی	(Vrba 2007) (Pires, Morato et al. 2017) (Majidipour, Najafi et al. 2021)
۳۴		امتیاز در دسترس بودن برای مقررات عملیات تاسیسات آب آشامیدنی و فاضلاب	محیط زیستی فیزیکی	(Gordon 2017)
۳۵		کیلوگرم کود مصرفی در هر هکتار	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۳۶		پتانسیل ردوکس	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۳۷		غلظت ترکیبات هتروآروماتیک	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۳۸		غلظت نمک در جریان	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)

۳۹		کیلوگرم آفت کش در هر هکتار	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017) (Pires, Morato et al. 2017)
۴۰		درصد سطح آبخوان با مشکل آلودگی آب‌های زیرزمینی بر اساس غلظت EC	محیط زیستی شیمیایی	(Hosseini, Parizi et al. 2019) (Samani 2021) (Pandey, Shrestha et al. 2011)
۴۱		غلظت نیتروژن	محیط زیستی شیمیایی	(Bui, Kawamura et al. 2019) (Pires, Morato et al. 2017)
۴۲		نفوذ آب نمک بر اساس منطقه با نفوذ نمک آب‌های زیرزمینی	محیط زیستی شیمیایی	(Bui, Kawamura et al. 2019)
۴۳		تغییر در کیفیت آب‌های زیرزمینی در مقایسه با دوره‌های کوتاه مدت و بلند مدت بر اساس غلظت EC	محیط زیستی شیمیایی	(Samani 2021)
۴۴		کاهش انتشار آلودگی به عنوان (نیترات) به مناطق تغذیه آب زیرزمینی	محیط زیستی شیمیایی	(Pires, Morato et al. 2017)
۴۵		شوری در آب‌های زیرزمینی یا غلظت رسانایی	محیط زیستی شیمیایی	(Pires, Morato et al. 2017) (Bui, Kawamura et al. 2016)
۴۶		نفوذ آب دریا در آب‌های زیرزمینی	محیط زیستی شیمیایی	(Pires, Morato et al. 2017)
۴۷		نواحی بدون کلیفرم آلوده	محیط زیستی شیمیایی	(Bui, Kawamura et al. 2016)
۴۸	کمیت آب زیرزمینی	برداشت مجاز کلی آب زیرزمینی بر اساس متر مکعب در سال	محیط زیستی فیزیکی	(Gordon 2017) (Pandey, Shrestha et al. 2011)
۴۹		مصرف سرانه آب زیرزمینی در سال	محیط زیستی فیزیکی	(Gordon 2017)
۵۰		قابلیت انتقال منطقه‌ای بر اساس متر مکعب	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۵۱		تعداد چاه‌های آسیب دیده / احیا شده / تکمیل شده به دلیل کاهش سطح آب	محیط زیستی فیزیکی	(Gordon 2017)
۵۲		درصد سطح آبخوان با مشکل بهره برداری بی رویه از آب‌های زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Bui, Kawamura et al. 2016) (Hosseini, Parizi et al. 2019)
۵۳		شاخص تنش آب زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Hosseini, Parizi et al. 2019) (Singh and Bhakar 2021) (Samani 2021)
۵۴		درصد پوشش شبکه پایش آب‌های زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Hosseini, Parizi et al. 2019)
۵۵		اثرات کاربری زمین بر اساس درصد سطح نفوذ ناپذیر	محیط زیستی فیزیکی	(Hosseini, Parizi et al. 2019)
۵۶		اثرات کاربری زمین بر اساس درصد پوشش طبیعی زمین/کاربری زمین	محیط زیستی فیزیکی	(Hosseini, Parizi et al. 2019)
۵۷		منطقه بحرانی بر اساس نسبت مساحت با سطح آب زیرزمینی کمتر از ۵ متر	محیط زیستی فیزیکی	(Bui, Kawamura et al. 2019)
۵۸		شاخص خشکسالی آب‌های زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Samani 2021)
۵۹		شاخص تامین منابع آب غیر متعارف در منطقه مورد مطالعه نسبت به منابع آب معمولی در دوره مورد مطالعه	محیط زیستی فیزیکی	(Samani 2021)
۶۰		شاخص توسعه آب زیرزمینی به عنوان درصدی از جزء تغذیه آب زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Pires, Morato et al. 2017)
۶۱		شاخص بهره برداری از آب‌های زیرزمینی بر اساس درصد در سال	محیط زیستی فیزیکی	(Pires, Morato et al. 2017)
۶۲		میزان تخلیه به آب‌های زیرزمینی بر حسب متر مکعب	محیط زیستی فیزیکی	(Pires, Morato et al. 2017)
۶۳		تغذیه القایی مصنوعی یا حجم منابع موجود به طور مصنوعی وارد سفره‌های زیرزمینی می‌شود	محیط زیستی فیزیکی	(Pires, Morato et al. 2017)
۶۴		شاخص خشکسالی آب‌های زیرزمینی GRACE	محیط زیستی فیزیکی	(Thomas, Caineta et al. 2017)
۶۵		ردپای یکپارچه آب زیرزمینی (IGWFT)	محیط زیستی فیزیکی	(Zarei, Parizi et al. 2022)

۶۶	نیازمندیهای تصفیه آب زیرزمینی	شاخص طبقه بندی آب‌های زیرزمینی به سه دسته با توجه به میزان تصفیه گسترده آب‌های زیرزمینی برای شرب	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Gordon 2017) (Singh and Bhakar 2021)
۶۷		شاخص طبقه بندی آب‌های زیرزمینی به سه دسته با توجه به میزان تصفیه گسترده آب‌های زیرزمینی برای آبیاری	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Gordon 2017) (Singh and Bhakar 2021)
۶۸	آسیب پذیری آب زیرزمینی	شاخص DRASTIC	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Pires, Morato et al. 2017) (Hosseini, Parizi et al. 2019) (Samani 2021) (Majidipour, Najafi et al. 2021) (Stempvoort, Ewert et al. 1993) (Ducci and Sellerino 2022)
۶۹		شاخص AVI	محیط زیستی فیزیکی	(Rukmana, Bargawa et al. 2020)
۷۰		شاخص GOD	محیط زیستی فیزیکی	(Samani 2021)
۷۱	توسعه انسانی	شاخص تغییر در درآمد شاخص توسعه انسانی در طول دوره مورد مطالعه	اقتصادی	(Samani 2021)
۷۲	سلامت انسان	شاخص تغییر در شاخص توسعه انسانی در طول دوره مورد مطالعه	اجتماعی	(Pires, Morato et al. 2017) (Chakravarty and Majumder 2005)
۷۳		شاخص فقر انسانی	اجتماعی	(Singh and Bhakar 2021)
۷۴		تأثیر سلامتی یا تعداد بیماری‌های گزارش شده به دلیل بیماری‌های منتقله از آب در هر هزار نفر جمعیت	اجتماعی	(Singh and Bhakar 2021)
۷۵		شاخص دسترسی برای مقدار آب زیرزمینی شیرین و قابل شرب در دسترس یک جامعه بر حسب هر نفر در روز	اجتماعی	(Gordon 2017)
۷۶	ترکیبات هیدروکربنی در آب زیرزمینی	غلظت ترکیبات هیدروکربنی	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017) (Dennis and Dennis 2012)
۷۷	اثر تغیرات اقلیمی بر آب زیرزمینی	شاخص DART	محیط زیستی فیزیکی	(Gordon 2017)
۷۸	مسوولیت نهادی	امتیاز برای مقررات استفاده / دفع آب یا چارچوب قانونی	نهادی	(Pandey, Shrestha et al. 2011) (Gordon 2017)
۷۹		درصد چاه‌ها با نظارت اجباری	نهادی	(Gordon 2017)
۸۰		درصد چاه‌های تامین کننده چاه‌های نظارتی شهرداری	نهادی	(Bui, Kawamura et al. 2019)
۸۱		اجرای قانون محیط زیست یا نسبت قانون محیط زیست رعایت شده	نهادی	(Majidipour, Najafi et al. 2021)
۸۲		ظرفیت نهادی یا تراکم نهادهای کشاورزان	اجتماعی	(Pires, Morato et al. 2017) (Pandey, Shrestha et al. 2011)
۸۳		تعداد بهره برداران آب زیرزمینی دارای مجوز طبق مقررات	اجتماعی	(Samani 2021) (Singh and Bhakar 2021)
۸۴	تولید و انتشار دانش	شاخص تغییر در آموزش شاخص توسعه انسانی در طول دوره مطالعه	اجتماعی	(Majidipour, Najafi et al. 2021)
۸۵		تولید و ارتقاء دانش در زمینه کشاورزی و مصرف بهینه آب	اقتصادی	(Singh and Bhakar 2021) (Pandey, Shrestha et al. 2011)
۸۶		شاخص آموزشی یا درصد افراد آموزش دیده و توانمند در زمینه مدیریت منابع آب	اجتماعی	

۸۷	فرونشست زمین	فرونشست زمین بر اساس سانتی متر در سال	محیط زیستی فیزیکی	(Bui, Kawamura et al. 2016) (Environment 2017) (Bui, Kawamura et al. 2019) (Pandey, Shrestha et al. 2011) (Samani 2021)
۸۸	چارچوب قانونی	شاخص امتیاز پایه ظرفیت سازمانی بر اساس قوانین مدیریت آب و تشخیص کارشناسی	نهادی	
۸۹		تعداد چاه‌های بدون مجوز	اجتماعی	(Majidipour, Najafi et al. 2021)
۹۰	غلظت فلزات در آب	غلظت یون آهن	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۹۱	زیرزمینی	غلظت یون منگنز	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۹۲		غلظت یون روی	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۹۳		غلظت یون منیزیوم	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017)
۹۴		غلظت یون ارسنیک	محیط زیستی شیمیایی	(Gordon 2017) (Bui, Kawamura et al. 2016) (Bui, Kawamura et al. 2019)
۹۵	کمیت آب‌های غیر تجدیدپذیر	مجموع منابع آب زیرزمینی تجدید ناپذیر قابل بهره برداری در هر برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی تجدید ناپذیر	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007)
۹۶	تعداد سایتهای آلوده	تعداد سایتهای آلوده روی آبخوان	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007)
۹۷	تراکم جمعیت	تعداد افراد ساکن در هر کیلومتر مربع از آبخوان	اجتماعی	(Gordon 2017) (Zarei, Parizi et al. 2022)
۹۸	رشد جمعیت	رشد جمعیت محلی آبخوان در سال به درصد	اجتماعی	(Gordon 2017)
۹۹	قیمت تامین آب زیرزمینی	هزینه پمپاژ آب به دلار آمریکا در هر متر مکعب	اقتصادی	(Gordon 2017)
۱۰۰	مشارکت اجتماعی	تعداد جلسات کارشناسی آب‌های زیرزمینی و برنامه‌های افزایش آگاهی در سال	اجتماعی	(Gordon 2017) (Pandey, Shrestha et al. 2011)
۱۰۱	دبی متر حجمی نصب شده	دبی متر حجمی نصب شده	اجتماعی	(Majidipour, Najafi et al. 2021)
۱۰۲	کمیت آب‌های تجدیدپذیر	سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر	محیط زیستی فیزیکی	(Vrba 2007) (Gordon 2017) (Samani 2021)
۱۰۳	بهره‌وری آب	بهره‌وری آب برای کشاورزی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب	اقتصادی	(Majidipour, Najafi et al. 2021)
۱۰۴	ظرفیت انسانی مرتبط با آب	ظرفیت انسانی مرتبط با آب یا تعداد افرادی که در حوزه مرتبط با آب کار می‌کنند	اجتماعی	(Bui, Kawamura et al. 2019)
۱۰۵	سطح ایستابی	سطح ایستابی یا سطح آب زیرزمینی	محیط زیستی فیزیکی	(Gordon 2017) (Pandey, Shrestha et al. 2011) (Pires, Morato et al. 2017)