

Systematic analytical review of evaluation methodologies for water resources adequacy in arid and semi-arid watersheds

Somayeh Mohammadi Jouzdani

Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

Email: Mohammadi24@ymail.com

(Received: 30 Jun 2025

Revised: 29 July 2025

Accepted: 17 September 2025)

Extended Abstract

Introduction: Evaluating the water resources adequacy in watersheds to meet local community needs is critically important—particularly in arid and semi-arid regions where water scarcity and environmental stress are significant. In the context of ongoing climate change and unsustainable water management practices, a comprehensive and multidimensional evaluation of water adequacy—encompassing quantitative, qualitative, institutional, and social dimensions—is essential. In Iran, as a country with a large proportion of arid and semi-arid regions, the necessity of addressing this issue is increasingly apparent. Accordingly, a systematic review of indicators and models for assessing water adequacy, accompanied by critical analysis and identification of research gaps, can provide a reliable foundation for developing evaluation frameworks that are suited to national conditions. Previous studies—largely based on approaches involving quantitative indicators, qualitative measures, institutional-social metrics, and simulation or decision-making models—have made significant contributions. However, they also exhibit several limitations, including a narrow focus on one or two dimensions (e.g., solely quantitative or qualitative), lack of context-specific indicators for dry regions with variable precipitation and limited resources, insufficient attention to social components such as local community resilience, distributive justice, and indigenous knowledge, and the absence of integrated conceptual frameworks that combine indicators with modeling tools and the actual needs of watershed inhabitants. Only a limited number of studies have succeeded in integrating productivity indicators, simulation models, and institutional measures to offer a comprehensive picture of water adequacy. Moreover, most existing research has not adequately addressed the specific needs of watershed communities in arid regions in terms of livelihoods, resilience, and participation. This review article comprehensively analyzes the most critical indicators, models, and challenges related to the evaluation of water resource adequacy in watershed areas, with a particular emphasis on the applicability and adaptability of these approaches to watersheds in arid and semi-arid environments.

Materials and methods: This critical analytical review study was conducted through a comprehensive search of international databases (Scopus, ScienceDirect), academic search engines (Google Scholar), and nationally credible databases (SID, Magiran), with source selection based on scientific credibility and thematic relevance. Through an analytical framework, the identified indices and models were categorized into six distinct groups: (1) quantitative indicators, (2) qualitative indicators, (3) institutional-social indicators, (4) productivity and indirect consumption measures, (5) risk and resilience metrics, and (6) simulation and decision-making models for water adequacy assessment. Each category was examined to identify its advantages, implementation challenges, and limitations, with particular emphasis on arid and semi-arid regions. The final synthesis focused on analyzing studies employing integrated approaches.

Results and Discussion: The review of 130 selected scientific studies reveals that, foremost, quantitative indicators are among the primary tools used to assess water resource adequacy in watersheds. At more advanced levels of analysis, qualitative indicators—particularly in studies concerned with environmental aspects—have received increasing attention. Additionally, indicators of indirect water use, such as water footprint, virtual water, and economic–physical productivity, have enabled recent studies to explore the water–livelihood nexus at both micro and macro scales. Institutional and resilience-related indicators—such as stakeholder participation, institutional flexibility, and the adaptive capacity of local systems—have opened new perspectives for understanding socio-structural sustainability in the context of water adequacy evaluations. Given the complexity introduced by limitations such as the lack of reliable data, institutional fragmentation, and environmental challenges, integrating various indicators and models—while considering the specific characteristics of arid and semi-arid regions, including those in Iran—is essential for delivering more accurate and practical assessments of water adequacy. Moreover, greater emphasis on institutional-social dimensions, as well as on risk and resilience, contributes to a deeper and more comprehensive understanding of the issue, and lays the foundation for the development of sustainable water resource management policies and strategies.

Conclusion: To enhance the effectiveness of evaluations, there is a need for up-to-date field data, coherent conceptual frameworks tailored to the specific region under study, and cross-sectoral collaboration. Future research must develop dynamic indicators and integrated, empirically-grounded models that address the evolving needs of watershed communities in arid and semi-arid regions and to support the achievement of sustainable water security. This study can provide valuable insights for water resource managers and policymakers to improve decision-making and promote sustainable resource management.

Keywords: Water resources adequacy, Evaluation indicator, Arid and semi-arid regions, Water resources assessment

Citation: Mohammadi Jouzdani, S. (2026). Systematic analytical review of evaluation methodologies for water resources adequacy in arid and semi-arid watersheds. *Integrated Watershed Management*, 6(2), 130-155. doi=10.22034/iwm.2025.2064423.1234

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



مرور تحلیلی نظام‌مند روش‌های ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز خشک و

نیمه خشک

سمیه محمدی جوزدانی

گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

*نویسنده مسئول: mohammadi24@ymail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

چکیده مبسوط

مقدمه: ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز برای تأمین نیازهای آبخیزنشینان، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که محدودیت‌های آبی و فشارهای زیست‌محیطی قابل توجه است، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به تغییرات اقلیمی و مدیریت ناپایدار منابع آب، تحلیل جامع و چندبعدی کفایت منابع آب از جنبه‌های کمی، کیفی، نهادی و اجتماعی ضروری است. در ایران به‌عنوان کشوری با وسعت قابل توجه از مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت توجه به این موضوع بیش از پیش حس می‌شود. از این رو، مرور نظام‌مند شاخص‌ها و مدل‌های ارزیابی کفایت منابع آب، همراه با تحلیل انتقادی و شناسایی خلأهای پژوهشی، می‌تواند مبنای قابل اعتمادی برای توسعه چارچوب‌های ارزیابی متناسب با شرایط کشور فراهم آورد. مطالعات پیشین که بیشتر بر اساس رویکردهایی همچون استفاده از شاخص‌های کمی، شاخص‌های کیفی، شاخص‌های نهادی-اجتماعی و مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری انجام شده، پیشرفت‌های مهمی داشته‌اند، اما با کاستی‌هایی همچون تمرکز صرف بر یک یا دو بعد (مثلاً تنها کمی یا تنها کیفی) و بدون نگاه سیستمی، فقدان شاخص‌های مناسب بومی برای مناطق خشک با نوسانات بارندگی و منابع محدود، کم‌توجهی به مؤلفه‌های اجتماعی مانند تاب‌آوری جوامع محلی، عدالت توزیعی و دانش بومی و نیز نبود چارچوب مفهومی یکپارچه برای ترکیب شاخص‌ها با مدل‌ها و نیازهای آبخیزنشینان روبرو بوده‌اند. مطالعات محدودی توانسته‌اند با ترکیب شاخص‌های بهره‌وری، مدل‌های شبیه‌سازی، و شاخص‌های نهادی، تصویری جامع از کفایت منابع ارائه دهند. همچنین، در اغلب مطالعات، نیازمندی‌های خاص آبخیزنشینان مناطق خشک، از منظر معیشت، تاب‌آوری و مشارکت، به‌طور کامل بررسی نشده‌اند. هدف از این مقاله مروری، ارائه تحلیلی جامع از کلیدی‌ترین شاخص‌ها، مدل‌ها و چالش‌های ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز برای آبخیزنشینان، با تأکید ویژه بر سازگاری این روش‌ها برای حوزه‌های آبخیز مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

مواد و روش‌ها: این مطالعه مروری تحلیلی-انتقادی با جستجوی هدفمند در پایگاه‌های بین‌المللی (ScienceDirect و Scopus)، موتورهای جستجوی علمی (Google Scholar) و پایگاه‌های معتبر ملی (SID و Magiran) انجام شد. منابع بر اساس اعتبار علمی و ارتباط موضوعی انتخاب و شاخص‌ها و مدل‌ها در چهارچوبی تحلیلی بر اساس شناخت و بررسی (۱) شاخص‌های کمی، (۲) شاخص‌های کیفی، (۳) شاخص‌های نهادی-اجتماعی، (۴) بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم، (۵) ریسک و تاب‌آوری، (۶) مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری در زمینه ارزیابی کفایت منابع آب دسته‌بندی شدند. سپس در هر گروه، مزایا، چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد آن‌ها به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناسایی و در بخش‌های مطالعات مبتنی بر رویکردهای ترکیبی تحلیل گردید.

نتایج و بحث: بررسی ۱۳۰ مطالعه علمی انتخاب شده نشان داد که نخست معیارهای کمی از مهم‌ترین ابزارهای سنجش کفایت منابع آب در حوزه‌ها هستند. در سطح بالاتری از مطالعات، شاخص‌های کیفی به ویژه برای مطالعات مرتبط با محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سویی، شاخص‌های مصرف غیرمستقیم منابع آب مانند ردپای آب، آب مجازی و بهره‌وری اقتصادی-فیزیکی، امکان تحلیل پیوند آب و معیشت در سطوح خرد و کلان را در مطالعات اخیر، فراهم کرده‌اند. در نهایت، شاخص‌های نهادی و تاب‌آوری مانند سطح مشارکت ذی‌نفعان، انعطاف‌پذیری نهادی و ظرفیت تاب‌آوری سیستم‌های محلی، افق جدیدی برای درک پایداری اجتماعی-ساختاری در ارزیابی کفایت آب ایجاد کرده‌اند. از آنجایی که محدودیت‌هایی مانند کمبود داده‌های دقیق، عدم هماهنگی نهادی و چالش‌های محیطی، روند ارزیابی را پیچیده می‌سازد، ترکیب شاخص‌ها و مدل‌ها با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، برای ارائه ارزیابی دقیق‌تر و کاربردی‌تر کفایت منابع حیاتی است. به‌علاوه، تأکید بر ابعاد نهادی-اجتماعی، ریسک و تاب‌آوری، به درک عمیق‌تر و جامع‌تر این مسئله کمک می‌کند و زمینه‌ساز توسعه سیاست‌ها و راهبردهای پایدار مدیریت منابع آب می‌شود.

نتیجه‌گیری: برای ارتقاء کارایی ارزیابی‌ها، نیاز به داده‌های میدانی به‌روز، چارچوب‌های مفهومی منسجم متناسب با منطقه مورد مطالعه و همکاری بین‌بخشی وجود دارد. پژوهش‌های آینده باید به سمت توسعه شاخص‌های پویا و مدل‌های یکپارچه بر اساس داده‌های واقعی حرکت کنند تا بتوانند پاسخگوی نیازهای متغیر آبخیزنشینان در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشند و به تضمین امنیت آبی پایدار کمک کنند. این مطالعه می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران منابع آب در بهبود تصمیم‌گیری و مدیریت پایدار کمک نماید.

واژه‌های کلیدی: کفایت منابع آب، شاخص ارزیابی، مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارزیابی منابع آب

استناد: محمدی جوزدانی، س. (۱۴۰۵). مرور تحلیلی نظام‌مند روش‌های ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۲)، ۱۳۰-۱۵۵.

حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

آب به عنوان یکی از حیاتی‌ترین منابع طبیعی، نقش محوری در توسعه پایدار و معیشت جوامع آبخیزنشین ایفا می‌کند. ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز برای تأمین نیازهای آبخیزنشینان، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که منابع آب محدود و شرایط اقلیمی نامساعد است، اهمیت فراوانی دارد. مفهوم کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز از نگاه تأمین صرف نیازهای شرب و کشاورزی فراتر رفته و اکنون شامل معیارهای متنوعی چون بهره‌وری، پایداری اکولوژیکی، عدالت اجتماعی و امنیت آبی نیز شده است (Gleick, 1998; Falkenmark & Rockström, 2004). در ابتدا، ارزیابی‌ها عمدتاً مبتنی بر محاسبه سرانه منابع آب تجدیدپذیر یا نسبت برداشت به منابع تجدیدپذیر بود، که در آن مقادیر ثابت سالانه با جمعیت یا مصارف سالانه مقایسه می‌شدند. با گذر زمان، ضرورت رویکردهای یکپارچه و سیستمی که بتوانند ابعاد کمی، کیفی، اقتصادی، و نهادی را تلفیق کنند، پررنگ‌تر شد (Hoekstra et al., 2011). در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، این تحول به‌صورت تدریجی رخ داده و در سال‌های اخیر، مدل‌ها و شاخص‌های پیچیده‌تری همچون ردپای آب، بهره‌وری اقتصادی آب، شاخص فشار، و شاخص ریسک خشکسالی وارد تحلیل‌ها شده‌اند (Karandish & Hoekstra, 2017). با توجه به تغییرات اقلیمی و مدیریت ناپایدار منابع آب، تحلیل جامع و چندبعدی کفایت منابع آب از جنبه‌های کمی، کیفی، نهادی و اجتماعی ضروری است. در ایران به‌عنوان کشوری با وسعت قابل توجه از مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت توجه به این موضوع بیش از پیش حس می‌شود. مطالعات انجام شده در این راستا، غالباً بر شاخص‌های کمی متمرکز بوده و ابعاد کیفی، نهادی و تأثیرات اجتماعی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Rafiei-Sardooi et al., 2022). از این رو، مرور نظام‌مند شاخص‌ها و مدل‌های ارزیابی کفایت منابع آب، همراه با تحلیل انتقادی و شناسایی خلأهای پژوهشی،

می‌تواند مبنای محکمی برای توسعه چارچوب‌های ارزیابی متناسب با شرایط ایران فراهم آورد. هدف از این مقاله مروری، معرفی و تحلیل انتقادی مهمترین شاخص‌ها، مدل‌ها، چهارچوب‌ها و ترکیب آن‌ها و همچنین مزایا و چالش‌های کاربرد آن‌ها در ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز برای آبخیزنشینان، با تأکید ویژه بر سازگاری این روش‌ها برای مناطق خشک و نیمه‌خشک است. شناخت و کاربرد این شاخص‌ها در مطالعات می‌تواند در بهبود تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران بخش آب برای مدیریت جامع و پایدار منابع آب یاری رساند.

تحول ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز و روش تحقیق

منظور از کفایت منابع آب در این مطالعه، توانایی سیستم در تأمین مقدار آب مورد نیاز برای رفع نیازهای مشخص در یک محدوده جغرافیایی، در بازه زمانی معین، با در نظر گرفتن معیارهای پایداری و کیفیت قابل قبول است. تاکنون مطالعات ارزیابی کفایت منابع آب که نیاز آبخیزنشینان را مدنظر دارد، بیشتر بر اساس رویکردهایی همچون استفاده از: (۱) شاخص‌های کمی، (۲) شاخص‌های کیفی، (۳) شاخص‌های نهادی-اجتماعی و (۴) مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری انجام شده است. این مطالعات در چهار دسته یادشده پیشرفت‌های مهم داشته‌اند، اما با کاستی‌هایی همچون تمرکز صرف بر یک یا دو بعد (مثلاً تنها کمی یا تنها کیفی) بدون نگاه سیستمی، فقدان شاخص‌های مناسب بومی برای مناطق خشک با نوسانات بارندگی و منابع محدود، کم‌توجهی به مؤلفه‌های اجتماعی مانند تاب‌آوری جوامع محلی، عدالت توزیعی و دانش بومی و نیز نبود چارچوب مفهومی یکپارچه برای ترکیب شاخص‌ها با مدل‌ها و نیازهای آبخیزنشینان روبرو بوده‌اند. این مطالعه مروری تحلیلی-انتقادی به روش جستجوی هدفمند در پایگاه‌های بین‌المللی (Scopus و ScienceDirect) و موتورهای جستجوی علمی (Google Scholar) و

پایگاه‌های معتبر ملی (SID و Magiran) انجام شد. انتخاب منابع بر اساس معیارهای اعتبارسنجی همچون انتشار در مجلات معتبر، ارتباط مستقیم با موضوع و نوآوری مفهومی یا کاربردی صورت گرفته است. پس از غربالگری اولیه، منابع نهایی در چهارچوبی تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفتند که حاصل آن دسته‌بندی جامع شاخص‌ها در ابعاد: (۱) کمی، (۲) کیفی، (۳) اجتماعی-نهادی و (۴) مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری بوده است. برای جامعیت بیشتر ارزیابی، دو رویکرد بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم و مطالعات مبتنی بر ریسک و تاب‌آوری و به‌ویژه رویکردهای ترکیبی اضافه گردید. سپس چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد آن‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناسایی و مورد بررسی واقع گردید.

۱- مطالعات مبتنی بر شاخص‌های کمی کلیدی

ارزیابی کمی منابع آب، یکی از بنیادی‌ترین ارکان مدیریت پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود؛ مناطقی که به واسطه ویژگی‌های اقلیمی، با محدودیت‌های شدیدی در عرضه منابع و افزایش فشار تقاضا مواجه هستند. شاخص‌های کمی در این بستر، ابزاری کلیدی برای سنجش اولیه وضعیت موجود و تصمیم‌گیری آگاهانه درباره تخصیص منابع محسوب می‌شوند (FAO, 2012).

یکی از شاخص‌های پایه و حیاتی در این حوزه، دبی جریان^۱ است که به عنوان شاخص اصلی تامین منابع آب سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش دبی جریان به دلیل بارش‌های محدود و الگوی پراکندگی نامناسب، چالش‌های جدی در مدیریت منابع آب ایجاد می‌کند (Milly et al., 2005). به همین دلیل، پایش مستمر و دقیق دبی جریان در این مناطق برای مدیریت و تخصیص بهینه منابع ضروری است. علاوه بر آن، شاخص ضریب رواناب^۲ در شناسایی مقدار آبی که

می‌تواند به صورت روان آب سطحی در دسترس قرار گیرد، کاربرد فراوان دارد (Huang et al., 2016). بارش مؤثر^۳ نیز شاخص مهمی است که به بخشی از بارش اشاره دارد که پس از کسر تبخیر و نفوذ عمیق، به صورت روان آب یا ذخیره قابل استفاده باقی می‌ماند. در شرایط اقلیمی خشک، با توجه به نرخ بالای تبخیر، این شاخص در تعیین منابع قابل بهره‌برداری آب اهمیت فراوانی دارد. همچنین، ذخیره آب زیرزمینی^۴ به عنوان منبع اصلی آب در این مناطق شناخته می‌شود (Ebrahimipour et al., 2015). حجم ذخیره و نرخ تغذیه سفره‌های زیرزمینی نقش اساسی در پایداری تأمین آب ایفا می‌کند. برداشت بیش از حد و عدم تجدید ذخایر آب زیرزمینی می‌تواند منجر به پدیده‌های مخرب زیست‌محیطی نظیر فرونشست زمین و کاهش کیفیت آب شود. لذا، ارزیابی و پایش ذخیره آب زیرزمینی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی کفایت منابع آب در مناطق خشک است (Thomas et al., 2017).

از دیگر شاخص‌های کمی که در مطالعات تحلیل کفایت منابع نقش اساسی داشته‌اند، می‌توان به شاخص تنش آبی^۵، اشاره کرد که نسبت میزان برداشت آب به منابع تجدیدپذیر را می‌سنجد و از سوی نهادهایی نظیر UN-Water و بانک جهانی برای رتبه‌بندی کشورها از نظر فشار آبی به کار می‌رود. Madani (۲۰۱۴) با استفاده از این شاخص، وضعیت هشداردهنده کمبود منابع آبی در بسیاری از نقاط کشور از جمله در حوضه‌های زاینده‌رود و دریاچه ارومیه را بیان نموده است.

شاخص برداشت نسبی آب^۶ نیز با رویکردی مشابه، میزان فشار وارده از سوی مصرف‌کنندگان مختلف بر منابع آبی را می‌سنجد. این شاخص به‌ویژه در ارزیابی اثرات برداشت بیش از حد از منابع زیرزمینی در استان‌های یزد، کرمان و خراسان جنوبی به‌کار رفته است (Alizadeh & Keshavarz, 2005).

4. Groundwater Storage
5. Water Stress Index
6. Water Withdrawal Ratio

1. River Discharge
2. Runoff Coefficient
3. Effective Precipitation

کمی، رویکردی تلفیقی و ضروری در تحلیل کفایت منابع آب در این مناطق به‌شمار می‌رود. در این زمینه، شاخص‌هایی چون شاخص کیفیت آب^۳ (WQI) جایگاه ویژه‌ای دارند. شاخص WQI با تجمع پارامترهای کلیدی کیفیت آب مانند pH، DO^۴، BOD^۵، TDS^۶ و نیترات، یک ارزیابی عددی از وضعیت کلی آب ارائه می‌دهد که امکان مقایسه و طبقه‌بندی مناطق مختلف را فراهم می‌سازد (Tyagi et al., 2013). در آبخوان ساوه-نوبران، این شاخص مبنای تصمیم‌گیری برای استفاده از منابع زیرزمینی در مصرف شرب قرار گرفته است (Sadat-Noori et al., 2014).

در مناطق خشک ایران که میزان شوری خاک و تبخیر بالا از پدیده‌های رایج هستند، شاخص‌هایی مانند هدایت الکتریکی^۷ (EC)، نسبت جذب سدیم^۸ (SAR) و باقیمانده کربنات سدیم^۹ (RSC) اهمیت بیشتری می‌یابند. این شاخص‌ها نشانگر میزان خطر شورشدگی یا قلیایی شدن خاک در اثر آبیاری با منابع با کیفیت پایین هستند و در مطالعاتی از حوضه‌های مختلف ایران به‌عنوان شاخص‌های تعیین‌کننده کیفیت آب برای کشاورزی یا شرب مورد بررسی قرار گرفته است (Pashahkha et al., 2022; Mohammadi Arasteh et al., 2024). از سوی دیگر، در مناطقی که تحت تأثیر فاضلاب‌های شهری یا صنعتی قرار دارند، برای ارزیابی آلودگی‌های ارگانیک استفاده از شاخص BOD^{۱۰} و برای ارزیابی آلاینده‌های شیمیایی کاربرد شاخص COD^{۱۰} ضروری است. در ایران Jalali و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه خود به بررسی و مقایسه آلودگی خاک‌های کشاورزی در ۴۶ سایت کشاورزی از ۱۷ استان ایران با استفاده از ردیابی عناصر (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) پرداختند. همچنین، Alizadeh

همچنین شاخص‌های مربوط به خشکسالی هیدرولوژیکی، مانند شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و شاخص استاندارد شده تبخیر-تعرق مؤثر^۱ (SPEI)، ابزارهای مهمی در شناسایی دوره‌های کم‌آبی و مدیریت بحران آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌آیند (McKee et al., 1993). در نهایت، ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن سطحی^۲ به عنوان شاخصی برای سنجش توانایی ذخیره آب در فصول پربابی و استفاده در دوره‌های کم‌آبی مطرح است. این شاخص در مناطق خشک که منابع سطحی محدود و ناپایدار است، اهمیت بسیار بالایی دارد و مستقیماً با توانایی تأمین آب پایدار برای آبخیزنشینان ارتباط دارد (Wurbs, 2005). در مجموع می‌توان گفت، تمرکز بر شاخص‌های کمی به عنوان پایه‌های اصلی ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود و شناخت و پایش این شاخص‌ها برای مدیریت جامع، پایدار و علمی منابع آب، ضروری خواهد بود.

۲- مطالعات مبتنی بر شاخص‌های کیفی کلیدی

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارزیابی کفایت منابع آب نمی‌تواند صرفاً بر پایه شاخص‌های کمی استوار باشد. کیفیت منابع موجود، به‌ویژه در شرایطی که منابع جایگزین کمی وجود دارد، به یکی از مؤلفه‌های اصلی تعیین کفایت منابع برای جمعیت آبخیزنشین بدل شده است (UNEP, 2016). کیفیت پایین منابع، چه ناشی از شوری طبیعی، چه به دلیل ورود آلاینده‌های کشاورزی و شهری، عملاً ظرفیت بهره‌برداری را محدود کرده و حتی منابع موجود را به منابعی ناکارا و غیرقابل استفاده تبدیل می‌کند (WWAP, 2018). از این‌رو، بررسی شاخص‌های کیفی آب در کنار شاخص‌های

6. Total Dissolved Solids
7. Electrical Conductivity
8. Sodium Adsorption Ratio
9. Residual Sodium Carbonate
10. Chemical Oxygen Demand

1. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
2. Reservoir Storage Capacity
3. Water Quality Index
4. Dissolved Oxygen
5. Biochemical oxygen demand

همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود نشان دادند که در منطقه دشت تهران - کرج غلظت نیترات بیش از سطح استاندارد برای مصارف نوشیدنی است که اثرات مخرب برای کودکان و افراد آسیب‌پذیر می‌تواند داشته باشد. نکته حائز اهمیت آن است که کیفیت منابع آب نه تنها برای شرب، بلکه برای مصارف کشاورزی، دامداری و صنعتی نیز باید ارزیابی شود. در مجموع، مرور ادبیات نشان می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ترکیبی از شاخص‌های عمومی مانند WQI، شاخص‌های ویژه برای شوری و قلیائیت مانند SAR و RSC، و شاخص‌های مرتبط با آلودگی‌های شیمیایی و بیولوژیک باید به کار گرفته شود.

۳- مطالعات مبتنی بر شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم منابع آب

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با محدودیت شدید منابع آب روبه‌رو هستند، داشتن آب کافی به تنهایی ضامن تأمین پایدار نیازهای مختلف آبخیزنشینان، نخواهد بود، بلکه بهره‌وری در استفاده از آب، چه در سطح مزرعه، چه در سطح منطقه و بخش اقتصادی، اهمیت فراوان دارد. در چنین شرایطی، شاخص‌های بهره‌وری آب و مصرف غیرمستقیم آن، به ابزاری تحلیلی برای ارزیابی کارآمدی و کفایت منابع بدل شده‌اند (Hoekstra, 2019; FAO, 2020). در این راستا، یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها، بهره‌وری فیزیکی آب^۱ (WP) است که میزان محصول تولیدی (معمولاً به کیلوگرم) را نسبت به حجم آب مصرف‌شده می‌سنجد. این شاخص، در مطالعات متعددی در اقلیم‌های مختلف ایران برای مقایسه‌ی عملکرد مصرف آب در بین محصولات مختلف به کار رفته است (Farahza et al., 2020; Asadi et al., 2023; Habibi et al., 2024).

در کنار شاخص WP، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب^۲ (EWP) قرار دارد که ارزش اقتصادی محصول را به ازای واحد حجم آب مصرف‌شده بررسی می‌کند. این شاخص،

به‌ویژه در مطالعات سیاست‌گذاری و تخصیص منابع، کاربرد دارد و در تعیین ترکیب بهینه کشت در زمین‌های کشاورزی بسیار مؤثر بوده است. شاخص EWP توجه را نه صرفاً حجم محصول، بلکه به سمت سودآوری مصرف آب سوق می‌دهد (Farahza et al., 2020; Asadi et al., 2023). از دیگر شاخص‌های بهره‌وری، شاخص بهره‌وری اجتماعی^۳ آب است که به معنای سنجش میزان تأثیرگذاری مصرف آب بر رفاه و توسعه پایدار جامعه و نه فقط بازده اقتصادی یا فیزیکی آن است (Ruddell & Rushforth, 2024).

در سطحی جامع‌تر، مفاهیمی مانند شاخص کل بهره‌وری آب^۴ یا شاخص بهره‌وری نهایی آب^۵ (MWP) در تحلیل‌های یکپارچه منابع در مناطق بحرانی مطرح شده‌اند. این شاخص‌ها امکان مقایسه بخش‌های مختلف مصرف (شرب، کشاورزی، صنعت) از نظر کارایی بهره‌برداری از منابع محدود آب را فراهم می‌سازند (Karandish & Hoekstra, 2017).

همچنین، مفهوم ردپای آب^۶ (WF) که نخستین بار توسط Hoekstra و همکاران (۲۰۱۲) توسعه یافت، مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب را در چرخه کامل تولید یک کالا یا خدمات در بر می‌گیرد. ردپای آب شامل سه مؤلفه آبی (آبی، سبز و خاکستری) است که به ترتیب مصرف آب آبی، بارش ذخیره‌شده در خاک، و میزان آبی که برای رقیق کردن آلاینده‌ها لازم است را بیان می‌کنند. این شاخص، در سطح ملی و بین‌المللی، ابزاری برای تحلیل پایداری تولید و مصرف و تجارت محصولات کشاورزی به‌شمار می‌رود (Mekonnen & Hoekstra, 2011). در مطالعه‌ای روی محصولات گندم، جو و ذرت در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، با محاسبه و مقایسه ردپای آب آبی و سبز، بر اهمیت مدیریت منابع آب تأکید شد (Ababaei & Etedali, 2017).

4. Total Water Productivity Index
5. Marginal WP
6. Water Footprint

1. Water Productivity
2. Economic Water Productivity
3. Social Water Productivity

ردپای آب، شاخص آب مجازی^۱ است که به میزان آبی اطلاق می‌شود که برای تولید یک کالا مصرف شده ولی در کالا حضور فیزیکی ندارد. اهمیت این مفهوم در سیاست‌گذاری واردات و صادرات کشاورزی و امنیت غذایی است. در ایران مطالعات بسیاری در دهه اخیر صورت گرفته که به در نظر گرفتن مقدار آب مجازی تولید کالاها برای مدیریت منابع آب تاکید دارند (Mardani et al., 2018; Hejabi & Yousefi, 2019; Qasempour et al., 2020).

شاخص بهره‌وری آب-انرژی^۲ (WEP) نیز از معیارهایی است که برای سنجش میزان تولید انرژی نسبت به مقدار آب مصرف یا از دست رفته در فرآیندهای مختلف (مانند تولید برق آبی یا آبیاری کشاورزی) به کار می‌رود. شاخص WEP به صورت مقدار انرژی تولید شده به ازای هر واحد آب مصرف یا از دست رفته تعریف می‌شود (به عنوان مثال گیگاوات-ساعت بر میلیارد مترمکعب آب)

(Basheer & Elagib, 2018; Zallaghi et al., 2020). این شاخص به سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا تصمیمات بهتری برای مدیریت همزمان منابع آب و انرژی اتخاذ کنند و از هدررفت منابع جلوگیری نمایند (Basheer & Elagib, 2018; Norouzi, 2022).

مرور مطالعات در این بخش نشان می‌دهد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم منابع آب نقش کلیدی در تحلیل کارآمدی این منابع در تخصیص دارند. مطالعات زیادی از مناطق مختلف ایران با بهره‌گیری از این شاخص‌ها، نشان داده‌اند که صرف دسترسی به آب کافی، تضمین‌کننده معیشت پایدار نیست، بلکه افزایش بهره‌وری، تغییر الگوی کشت و سیاست‌گذاری مبتنی بر WFP، الزامی است. در جدول ۱، تعریف علمی، کاربرد و روش ارزیابی مهمترین شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم منابع آب ارائه شده است.

جدول ۱ - شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم منابع آب

Table 1- Indicators of Productivity and Indirect Consumption of Water Resources

عنوان شاخص	تعریف علمی	کاربرد	ابزار ارزیابی/محاسبه
ردپای آب	حجم کل آب مصرف‌شده مستقیم و غیرمستقیم در تولید یک کالا یا خدمت	ارزیابی تأثیر مصرف محصولات مختلف بر منابع آب	ابزار آنالین WFAT، مدل WaterStat، داده‌های FAO و UN
آب مجازی	مقدار آبی که در فرآیند تولید یک کالا مصرف شده و همراه کالا به صورت پنهان بین مناطق مبادله می‌شود	تحلیل تجارت آب و وابستگی مناطق به منابع آب خارجی	ماتریس‌های تبادل کالا، مدل‌های اقتصاد کلان و ترازنامه محصولات
بهره‌وری فیزیکی آب	نسبت تولید محصول فیزیکی (kg, ton)، به واحد آب مصرفی (m ³)	سنجش کارایی مصرف آب در کشاورزی	داده‌های کشاورزی، معادلات تراز آبی، مدل‌های زراعی
بهره‌وری اقتصادی آب	ارزش اقتصادی تولید (ریال/دلار) به ازای حجم آب مصرفی	مقایسه اقتصادی کاربری‌های آب در حوزه آبخیز	داده‌های اقتصادی محصول، قیمت بازار، نرم افزار Excel/Matlab
بهره‌وری اجتماعی آب	میزان اشتغال یا رفاه اجتماعی حاصل از هر واحد مصرف آب	تحلیل ارتباط بین آب و توسعه اجتماعی	داده‌های آماری اشتغال، مدل‌های نهادی
بهره‌وری چندمنظوره آب	مقدار کل تولید (اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی) از هر مترمکعب آب مصرفی	ارزیابی جامع کارایی منابع آبی در کاربری‌های چندمنظوره	چارچوب FAO، مدل AquaCrop
بهره‌وری آب-انرژی	نسبت انرژی تولید شده یا صرفه‌جویی شده به میزان آب مصرفی	تحلیل پیوند آب و انرژی	داده‌های انرژی، مدل‌های هیدروالکتریک یا کشاورزی مدرن

۴- مطالعات مبتنی بر شاخص‌های نهادی- اجتماعی

ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز تنها به ابعاد کمی و کیفی یا بهره‌وری محدود نمی‌شود، بلکه نهادها، رفتار اجتماعی، و ظرفیت حکمرانی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تحقق این کفایت -به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که فشار بر منابع و تعارضات بهره‌برداری بالا است- ایفا می‌کنند. از این‌رو، در سال‌های اخیر، مجموعه‌ای از شاخص‌های نهادی- اجتماعی برای تکمیل تحلیل فنی و اقتصادی در چارچوب‌های ارزیابی کفایت منابع توسعه یافته‌اند.

یکی از شاخص‌های کلیدی در این زمینه، شاخص حکمرانی آب^۱ است که کیفیت نهادهای مرتبط با تصمیم‌گیری، سیاست‌گذاری، مشارکت، شفافیت، و اجرای قوانین را در مدیریت منابع آب ارزیابی می‌کند (OECD, 2015). مطالعات متعددی از جمله توسط Varis و Rahaman (۲۰۰۶) و Savenije و Vander (۲۰۰۵) نشان داده‌اند که ضعف در حکمرانی، یکی از موانع اصلی تحقق کفایت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود.

دومین شاخص مهم در این حوزه، شاخص مشارکت ذی‌نفعان^۲ است که به میزان دخالت فعالانه بهره‌برداران محلی، سازمان‌های مدنی و نهادهای محلی در فرآیند تصمیم‌گیری منابع آب توجه دارد. مشارکت مؤثر نه تنها مشروعیت سیاست‌ها را افزایش می‌دهد بلکه احتمال موفقیت در اجرای طرح‌های مدیریت منابع را بالا می‌برد (Pahl-Wostl et al., 2007). در ایران نیز Ghorbani و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش خود با استفاده از رویکرد تحلیل شبکه و تأکید بر پیوندهای اعتماد و مشارکت و شاخص‌های کمی در سطح شبکه ذی‌نفعان محلی، نشان دادند که تقویت اعتماد و مشارکت اجتماعی در منطقه مورد مطالعه برای افزایش

سرعت گردش اطلاعات و منابع و همچنین افزایش اتحاد در بین ذی‌نفعان الزامی است تا از این طریق بتوان زمان اجرای مدیریت مشارکتی منابع آب را کاهش داده و به موفقیت دست یافت.

شاخص سوم، شاخص ظرفیت نهادی^۳ است که ساختارها، منابع انسانی، قوانین و توانمندی‌های سازمان‌های محلی و دولتی را در مدیریت بهینه منابع آب می‌سنجد. ظرفیت نهادی پایین در بسیاری از مناطق خشک کشور به کاهش کارایی تخصیص و کنترل بهره‌برداری منجر شده است (Madani et al., 2016).

چهارمین شاخص، شاخص عدالت اجتماعی آب^۴ است که به تحلیل میزان برابری در دسترسی به منابع آب بین گروه‌های مختلف اجتماعی (برحسب درآمد، جنسیت، مکان جغرافیایی) می‌پردازد (Mehta et al., 2019). شاخص‌های عدالت آب معمولاً شامل ترکیبی از شاخص‌های ساختاری، فرایندی و پیامدی هستند. این شاخص‌ها نرخ تغییرات را نسبت به نرخ‌های معیار مقایسه می‌کنند تا پیشرفت یا پسرفت عدالت را بسنجند و امکان مقایسه بین کشورها و در طول زمان را فراهم می‌کنند (Luh et al., 2013). مرور منابع داخلی نشان داد بررسی این شاخص در مدیریت منابع آب کمتر مورد توجه واقع شده است.

در برخی چارچوب‌ها، شاخص اعتماد نهادی^۵ نیز به‌عنوان مکمل در تحلیل اجتماعی مطرح است. اعتماد متقابل بین بهره‌برداران و نهادهای مدیریت آب نقش مهمی در پذیرش سیاست‌های محدودکننده مصرف یا تخصیص مجدد منابع ایفا می‌کند.

در مجموع، استفاده از این شاخص‌ها در کنار شاخص‌های کمی، کیفی و بهره‌وری، امکان تحلیل چندبعدی کفایت منابع آب را فراهم می‌سازد. به‌ویژه در مناطق خشک که اغلب با چالش‌های ساختاری در نهادهای محلی، ضعف حکمرانی، و تعارضات اجتماعی

4. Water Equity Index

5. Institutional Trust Index

1. Water Governance Index

2. Stakeholder Participation Index

3. Institutional Capacity Index

مواجه هستند، ارزیابی نهادی- اجتماعی می‌تواند نقشی کلیدی در سیاست‌گذاری موفق منابع ایفا کند.

۵- مطالعات مبتنی بر شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری

در حوزه ارزیابی کفایت منابع آب، عدم قطعیت‌های اقلیمی، تغییرات بلندمدت هیدرولوژیکی، و فشارهای انسانی فزاینده ایجاب می‌کند که صرفاً به ارزیابی وضعیت فعلی منابع بسنده نشود، بلکه توان حوزه آبخیز در مواجهه با مخاطرات و بازگشت‌پذیری آن نیز مورد توجه قرار گیرد. در این چارچوب، شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری به عنوان ابزارهایی مکمل برای تحلیل پویایی‌های سیستم منابع آب مطرح شده‌اند، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که نوسانات بارندگی، خشکسالی‌های شدید و بهره‌برداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی از ویژگی‌های ساختاری آن‌ها است (Vorosmarty et al., 2000). از شاخص‌های رایج در این حوزه، شاخص ریسک کم‌آبی^۱، است که به عنوان ابزاری برای سنجش و مدیریت خطرات ناشی از کمبود آب در مناطق مختلف مطرح است. این شاخص با ترکیب عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا نقاط آسیب‌پذیر را شناسایی و برای مقابله با بحران کم‌آبی برنامه‌ریزی کنند. این شاخص میزان زیان اقتصادی ناشی از کمبود آب را اندازه‌گیری می‌کند و شامل دو بخش است: ریسک کم‌آبی^۲ محلی (LWSR) که به زیان اقتصادی در محل اشاره دارد، و ریسک کم‌آبی^۳ مجازی (VWSR) که انتقال این ریسک از طریق تجارت را در نظر می‌گیرد (Chen et al., 2022).

در ارتباط با بعد اجتماعی-اقتصادی، شاخص آسیب‌پذیری آب^۴ توسعه یافته که از سه مؤلفه اصلی

آسیب‌پذیری فیزیکی، اقتصادی و نهادی تشکیل می‌شود. این شاخص می‌تواند مشخص کند که چه مناطقی و چه گروه‌هایی از جامعه، بیشتر در معرض تأثیر خشکسالی یا بحران‌های آبی هستند، و این ارزیابی می‌تواند در برنامه‌ریزی برای تخصیص منابع و مداخلات حمایتی استفاده شود. شاخص آسیب‌پذیری آب معمولاً بر اساس سه مؤلفه اصلی ساخته می‌شود: میزان مواجهه^۵، حساسیت^۶ و ظرفیت تطبیق^۷ (Mansir et al., 2021).

در مطالعات، توجه فزاینده‌ای به شاخص‌های تاب‌آوری منابع آب^۸ نیز شده است. تاب‌آوری در این حوزه به توان یک سیستم برای جذب، سازگاری و بازیابی از اختلالات هیدرولوژیکی یا انسانی اطلاق می‌شود (Walker et al., 2004). شاخص‌هایی نظیر تنوع منابع تأمین، انعطاف‌پذیری در تخصیص، و ظرفیت ذخیره‌سازی از جمله مؤلفه‌های تاب‌آوری هستند. روش‌های محاسبه شاخص تاب‌آوری منابع آب عمده‌تاً مبتنی بر مدل‌های چندمعیاره، شاخص‌های کمی و کیفی، و تحلیل‌های آماری هستند. انتخاب روش به هدف، نوع سیستم و داده‌های موجود بستگی دارد (Behboudian & Kerachian, 2021; Xu et al., 2022). در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مانند دشت مشهد، اصفهان، این شاخص‌ها به‌ویژه در تعیین وضعیت منابع آب مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Dogani et al., 2020; Yaraghi & Fard & Shokoohi, 2023).

همچنین، شاخص‌های تاب‌آوری نهادی^۹ نظیر توانایی سیستم حکمرانی در یادگیری، تطبیق سیاست‌ها، و پاسخ به بحران‌های آب نیز به‌طور فزاینده‌ای در ارزیابی‌های بین‌المللی مورد توجه هستند (Folke et al., 2010). این شاخص‌ها در چارچوب ارزیابی‌های

6. Sensitivity

7. Adaptive Capacity

8. Water Resilience Indicators

9. Institutional Resilience Index

1. Water Scarcity Risk Index

2. Local Water Scarcity Risk

3. Virtual Water Scarcity Risk

4. Water Vulnerability Index

5. Exposure

میان‌رشته‌ای، مکمل تحلیل‌های فیزیکی و اجتماعی محسوب می‌شوند.

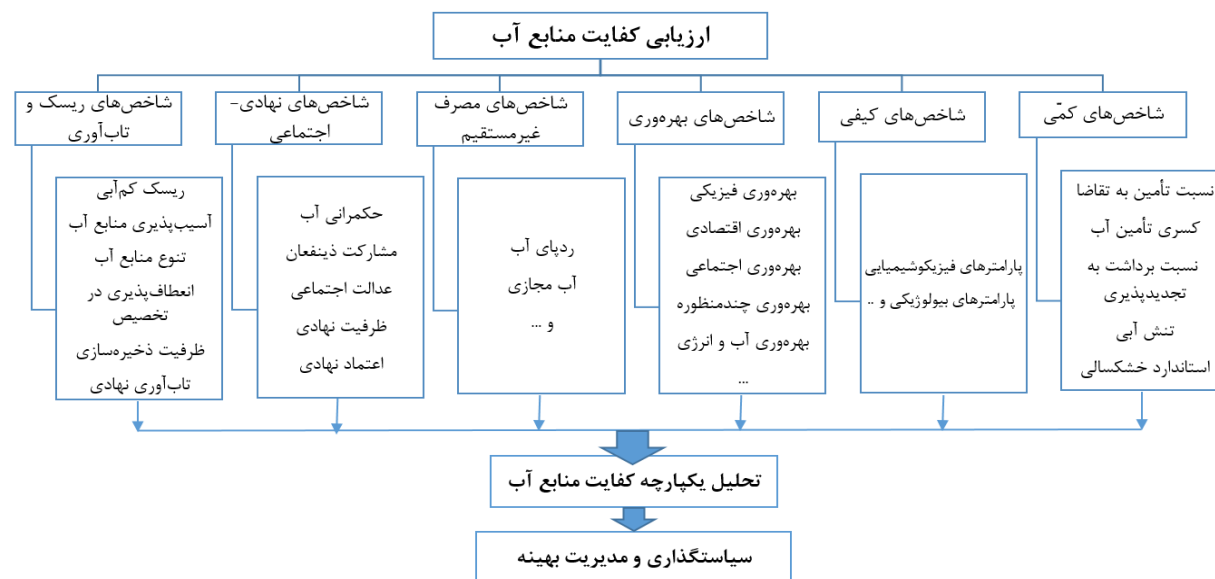
در برخی مطالعات، از چارچوب‌های ترکیبی مانند شاخص تاب‌آوری-ریسک^۱ نیز استفاده شده است که با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیستم‌ها، تعامل بین شوک‌ها و پاسخ‌های سیستمی را تحلیل می‌کند. به عنوان جمع‌بندی، شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری به‌عنوان مکمل ضروری در کنار شاخص‌های کمی،

کیفی و نهادی-اجتماعی، درک جامع‌تری از کفایت منابع آب در شرایط پرفشار مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه می‌دهند. بهره‌گیری از آن‌ها در سیاست‌گذاری، می‌تواند منجر به افزایش توان انطباق‌پذیری جوامع و کاهش احتمال بحران‌های آبی آینده گردد. در جدول ۲ و شکل ۱ مرور ساختاریافته شاخص‌ها و ابزارهای ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز، با تأکید بر مناطق خشک و نیمه‌خشک، ارائه شده است.

جدول ۲- مهمترین شاخص‌ها و ابزارهای ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک

Table 2- The most important indicators and tools for evaluating water resource adequacy in arid and semi-arid watersheds

منابع	کاربرد کلیدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک	نمونه شاخص‌ها / ابزارها	دسته‌بندی
FAO (2012)	تشخیص کسری منابع و اولویت‌بندی مدیریت منابع سطحی/زیرزمینی	نسبت تأمین به تقاضا، کسری تأمین آب، نسبت برداشت به تجدیدپذیری	شاخص‌های کمی
UNEP (2016)	ارزیابی کیفیت منابع در شرایط کم‌آبی و تمرکز آلاینده‌ها	شاخص کیفیت آب، شاخص نیترات، شاخص آلودگی چندگانه	شاخص‌های کیفی
Hoekstra et al. (2012); Molden et al. (2013)	تحلیل مصرف غیرمستقیم و پایداری اقتصادی-زیست‌محیطی تولیدات کشاورزی	ردپای آب، بهره‌وری فیزیکی/اقتصادی آب، بهره‌وری آب-انرژی	شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم آب
OECD (2015); Pahl-Wostl (2007)	تحلیل ظرفیت اجتماعی و نهادی برای سازگاری با تنش‌های آبی	شاخص حکمرانی آب، شاخص مشارکت، شاخص نهادهای محلی	شاخص‌های نهادی-اجتماعی
Folke et al. (2010);	برآورد آسیب‌پذیری و توان بازگشت سیستم به شرایط پایدار	شاخص تاب‌آوری منابع آب، شاخص آسیب‌پذیری، ریسک کم‌آبی، تاب‌آوری نهادی	شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری



شکل ۱- چهارچوب مفهومی ارزیابی کفایت منابع آب

Figure 1- Conceptual framework for evaluating water resource adequacy

۶- مطالعات مبتنی بر مدل‌های ارزیابی

با توجه به پیچیدگی فزاینده روابط بین منابع آب، نیازهای متنوع بهره‌برداران، نوسانات اقلیمی و محدودیت‌های محیطی، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری به یکی از ارکان اساسی ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز تبدیل شده است. این مدل‌ها به مدیران منابع آب و سیاست‌گذاران امکان می‌دهند تا ضمن بررسی وضعیت موجود، آثار اقدامات مدیریتی و سناریوهای آتی را نیز تحلیل کنند. در این بخش، مدل‌هایی که بیشترین کاربرد و اعتبار علمی را در این حوزه داشته‌اند معرفی می‌شوند.

(a) مدل WEAP^۱

مدل WEAP یکی از جامع‌ترین ابزارهای برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب است که توسط موسسه SEI^۲ توسعه یافته و در کشورهای مختلف، از جمله ایران، مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل قادر است منابع و مصارف آب، نیازهای محیط‌زیستی، سناریوهای تغییر اقلیم و گزینه‌های مدیریتی را به صورت یکپارچه شبیه‌سازی کند. ساختار ساده، قابلیت اتصال به GIS و امکان تعریف سیاست‌های مختلف تخصیص، از جمله مزایای این مدل هستند (Yates et al., 2005; SEI, 2015). در ایران، این مدل در مناطق کم آبی همچون حوزه دشت قزوین، هیرمند، بلوچستان، بجنورد برای تحلیل سناریوهای تخصیص آب مورد استفاده قرار گرفته است (Ramroodi et al., 2015; Hekmatnia et al., 2022; Ahmadi, 2022).

(b) مدل SWAT^۳

مدل SWAT یکی از معتبرترین مدل‌های فرآیندمحور برای شبیه‌سازی بلندمدت رفتار منابع آب در مقیاس حوزه آبخیز است. این مدل با رویکرد نیمه‌توزیعی، امکان بررسی تولید رواناب، رسوب، آلودگی غیرنقطه‌ای

و اثرات تغییر کاربری زمین بر منابع آب را فراهم می‌سازد (Arnold et al., 2012). در مطالعات متعدد در حوزه‌های آبخیز کشور، از جمله حوزه آبریز زاینده‌رود، لار، دامغانرود، رودخانه سرباز و حوضه‌های فاقد آمار مناطق خشک و نیمه‌خشک برای شبیه‌سازی میزان رواناب تحت سناریوهای مختلف به کار گرفته شده است (Amini et al., 2018; Sayad et al., 2020; Hamed et al., 2022; Khosravi et al., 2022; Kiyani Majd et al., 2023).

(c) مدل MODSIM

مدل MODSIM ابزاری برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تخصیص منابع آب در شبکه‌های پیچیده رودخانه‌ای است که با استفاده از الگوریتم‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی به تعیین الگوی بهینه تخصیص آب بین مصارف مختلف می‌پردازد (Labadie, 2006). این مدل برای تحلیل وضعیت کفایت منابع آب تحت شرایط محدودیت کمی و تقاضای رقابتی در بین مصرف‌کنندگان مختلف کاربرد دارد. این مدل قابلیت اتصال به مدل‌های بهینه‌سازی همچون PSO^۴ و مدل‌های هیدرولوژیکی همچون SWAT را دارد (Ebrahimi & Shourian, 2022; Aliyari و همکاران ۲۰۱۹). از این مدل برای مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک که شامل مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی بود، استفاده نمودند. همچنین مدل MODSIM در ایران برای مدل‌سازی، برنامه‌ریزی و یا ارزیابی طرح‌های توسعه منابع آب استفاده گردیده است (Mohseni Zadeh & Shourian, 2018).

(d) مدل MIKE SHE

مدل MIKE SHE یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی و فیزیکی‌مبناست که قادر به شبیه‌سازی همزمان جریان سطحی، زیرسطحی، تبخیر-تعرق، نفوذ، زهکشی و تبادل آب زیرزمینی، انتقال آلودگی در آب‌های سطحی و زیرزمینی در اراضی شهری و غیرشهری، ارزیابی اثرات

3. Soil and Water Assessment Tool
4. Particle Swarm Optimization

1. Water Evaluation and Planning System
2. Stockholm Environment Institute

تغییر اقلیم، تغییر کاربری اراضی و سناریوهای مدیریتی منابع آب، تحلیل سیستم‌های آبیاری، زهکشی و مدیریت آب در اراضی کشاورزی و... است و محدوده مقیاس مکانی مورد کاربرد آن از زیرحوضه‌های کوچک (کمتر از یک کیلومتر مربع) تا حوضه‌های بزرگ (هزاران کیلومتر مربع) می‌باشد (Jaber & Shukla, 2012; Prucha et al., 2016; Wang et al., 2024). همچنین مدل MIKE SHE به طور گسترده‌ای قابلیت اتصال و یکپارچه‌سازی با مدل‌های هیدرولیکی، کیفیت آب، ابزارهای کالیبراسیون و مدل‌های تصمیم‌یار را دارد (Prucha et al., 2016). در ایران Sodori و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از این مدل جریان سطحی و زیرزمینی در حوزه آبریز فومنات را شبیه‌سازی نمودند.

(e) مدل RIBASIM^۱

مدل RIBASIM، توسط موسسه Deltares هلند برای شبیه‌سازی یکپارچه منابع و مصارف آب در حوضه‌های رودخانه‌ای در سال ۲۰۱۴ ارائه و در سال ۲۰۲۳ توسعه یافته است. این مدل با استفاده از ساختار گراف‌محور، امکان تحلیل تعاملات پیچیده بین منابع سطحی، زیرزمینی، شبکه‌های انتقال و مخازن را فراهم می‌کند. RIBASIM برای ارزیابی سناریوهای تخصیص آب، تحلیل کمبود، و طراحی سیاست‌های بهره‌برداری در شرایط خشک‌سالی مناسب است. در ایران Ahmadzadeh و همکاران (۲۰۲۲) از این مدل به عنوان مدل تکمیلی در ارزیابی قابلیت اعتماد تأمین تقاضای آب با توجه به تغییرات اقلیمی و پروژه‌های آبی اجرایی، برای تخصیص منابع آب بر اساس عرضه و تقاضا بهره بردند.

(f) مدل HEC-HMS^۲

مدل HEC-HMS، توسعه‌یافته توسط مهندسان ارتش آمریکا، برای شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز نسبت به بارش کاربرد دارد. این مدل با تمرکز بر فرآیندهای بارش-رواناب، ابزاری مناسب برای تحلیل

سیلاب، رواناب سطحی و زمان‌بندی تأمین منابع آب به شمار می‌رود (Feldman, 2000). در ایران Zare و همکاران (۲۰۲۱) و Majidi و Shahedi (۲۰۱۲) برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک، از این مدل استفاده نمودند.

در مجموع، کاربرد مدل‌های فوق به درک جامع‌تری از کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز می‌انجامد و به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های مرتبط با تغییر اقلیم، افزایش تقاضا، و تعارضات بین بهره‌برداران، ابزاری علمی و راهبردی در اختیار مدیران قرار می‌دهد. ترکیب این مدل‌ها با شاخص‌های کمی و کیفی و تلفیق آن‌ها در چارچوب‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، می‌تواند به ارتقاء عدالت و بهره‌وری در مدیریت منابع آب کمک شایانی کند (Madani, 2010).

چالش‌ها و محدودیت‌ها در ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز برای آبخیزنشینان

ارزیابی کفایت منابع آب در مقیاس حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه برای رفع نیازهای متنوع آبخیزنشینان، با چالش‌های متعددی در سطوح مفهومی، داده‌ای، نهادی و تکنیکی همراه است. این چالش‌ها نه تنها دقت و جامعیت نتایج ارزیابی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه بر تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز تأثیرگذارند. در ادامه چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد شاخص‌ها و مدل‌های ذکر شده به تفکیک بررسی شده‌اند.

(a) شاخص‌های کمی

مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل بارندگی کم، تبخیر بالا و نوسانات شدید اقلیمی، دارای تغییرات زمانی و مکانی قابل توجهی در منابع آب هستند که باعث می‌شود شاخص‌های کمی معمولاً نتوانند به‌خوبی این پیچیدگی‌ها را منعکس کنند (Yan et al., 2024). بسیاری از چارچوب‌ها و شاخص‌های ارزیابی موجود، ویژگی‌های خاص مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند

کارائی لازم را نداشته باشند؛ بنابراین نیاز به توسعه یا بومی‌سازی شاخص‌های ویژه این مناطق وجود دارد (Panahi et al., 2021; Jalali et al., 2024).

(c) شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم آب از مهم‌ترین چالش‌های کاربرد شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم آب برای ارزیابی کفایت منابع آب این است که شاخص‌هایی مانند بهره‌وری اقتصادی آب (مانند ارزش افزوده به ازای هر واحد آب) لزوماً بازتاب‌دهنده بهبود واقعی کارایی مصرف آب نیستند و بیشتر تحت تأثیر رشد اقتصادی و سرمایه‌بری^۱ قرار می‌گیرند تا کاهش فشار واقعی بر منابع آب، که می‌تواند به سیاست‌گذاری‌های نادرست منجر شود (Ozcelik et al., 2024). به عنوان مثال، نصب سیستم‌های آبیاری گران‌قیمت که بازده اقتصادی را بالا می‌برند یا صنایع فناوری‌محور که باعث افزایش ارزش افزوده می‌شوند، به معنای کاهش مصرف آب نیستند. همچنین، شاخص‌های مصرف غیرمستقیم آب (مانند ردپای آب یا آب مجازی) به دلیل پیچیدگی زنجیره تأمین و دشواری در جمع‌آوری داده‌های دقیق، ممکن است برآوردهای دقیقی از مصرف واقعی آب ارائه ندهند و درک صحیحی از فشار بر منابع آب محلی ایجاد نکنند (Marston et al., 2020; Amini et al., 2024). علاوه بر این، این شاخص‌ها اغلب به تفاوت‌های مکانی، اقلیمی و ساختار کشت توجه کافی ندارند و ممکن است برای مناطق مختلف حوزه آبخیز نتایج متفاوت و حتی متناقضی ارائه دهند (Sadeghi et al., 2020; Yan et al., 2020). تغییرات اقلیمی و نوسانات بارش و تبخیر نیز حساسیت بالایی در نتایج این شاخص‌ها ایجاد می‌کند و ارزیابی پایداری منابع آب را دشوار می‌سازد (Cao et al., 2021). همچنین عدم توجه به ابعاد اجتماعی و زیست‌محیطی بهره‌برداری از آب، می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های ناکارآمد برای آبخیزنشینان شود (Da Cunha E Silva et al., 2022). بنابراین، استفاده از این شاخص‌ها باید با

نبود منابع آب دائمی، وابستگی شدید به بارش‌های فصلی و تأثیرپذیری از تغییرات اقلیمی را به‌درستی لحاظ نمی‌کنند و نیاز به توسعه شاخص‌های بومی و متناسب با شرایط محلی احساس می‌شود (Alsaeed et al., 2024).

(b) شاخص‌های کیفی

یکی از مهم‌ترین چالش‌های کاربرد شاخص‌های کیفی آب برای ارزیابی منابع آب در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، تنوع و پیچیدگی پارامترهای کیفی آب است که به دلیل شوری بالا، قلیائیت و حضور یون‌های خاص مانند سدیم و کلراید، ارزیابی را دشوار می‌کند به طوریکه بسیاری از شاخص‌های استاندارد ممکن است برای این مناطق مناسب نبوده یا نیاز به تعدیل داشته باشند (Pandey et al., 2023; Jalali et al., 2024). همچنین، استفاده از شاخص‌های کیفی با حدود مجاز بسیار سخت‌گیرانه می‌تواند منجر به کاهش منابع قابل استفاده و افزایش هزینه‌های پایش شود (Bortolini et al., 2018). تغییرات فصلی و مکانی کیفیت آب، به ویژه در اثر بارش‌های محدود و تبخیر بالا، باعث می‌شود نتایج شاخص‌ها در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت باشد و نیاز به پایش مستمر و داده‌های کافی وجود داشته باشد (Singhal et al., 2020; Wang & Wang, 2023). علاوه بر این، تأثیر شدید فعالیت‌های انسانی مانند مصرف بیش از حد کود و آلودگی صنعتی، باعث می‌شود شاخص‌های کیفی آب به تنهایی نتوانند تصویر کاملی از وضعیت منابع آب ارائه دهند و باید با تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی و مدل‌های پیش‌بینی ترکیب شوند (Panahi et al., 2021; Pandey et al., 2023; Ghosh, 2024). محدودیت دیگر، هزینه و دشواری جمع‌آوری داده‌های کافی و دقیق در مناطق وسیع و با دسترسی محدود است (Singhal et al., 2020). در نهایت، بسیاری از شاخص‌ها برای آب‌های سطحی طراحی شده‌اند و ممکن است برای آب‌های زیرزمینی در این اقلیم‌ها

احتیاط و همراه با سایر ابزارهای مدیریتی و داده‌های محلی انجام گیرد تا ارزیابی واقع‌بینانه‌تری از کفایت منابع آب برای ساکنان حوزه آبخیز حاصل شود (Marston et al., 2020; Amini et al., 2024; Ozcelik et al., 2024).

(d) شاخص‌های نهادی-اجتماعی

نبود اجماع بر سر شاخص‌های مناسب و نحوه سنجش آن‌ها از مهم‌ترین چالش‌های کاربرد شاخص‌های نهادی-اجتماعی برای ارزیابی کفایت منابع آب حوزه‌های آبخیز است. برخلاف شاخص‌های فنی و اقتصادی، شاخص‌های اجتماعی و نهادی اغلب به‌درستی تعریف نشده‌اند و اعتبار و قابلیت اطمینان آن‌ها محل تردید است (Polonenko et al., 2019). همچنین، این شاخص‌ها به‌شدت به زمینه‌های محلی، فرهنگی و ساختارهای حکمرانی وابسته‌اند و تعمیم‌پذیری محدودی دارند (Polonenko et al., 2021; Mirchooli et al., 2019). جمع‌آوری داده‌های اجتماعی و نهادی معمولاً دشوار و پرهزینه است و ممکن است داده‌ها ناقص یا غیرقابل اتکاء باشند (Mirchooli et al., 2021). علاوه بر این، شاخص‌های اجتماعی و نهادی اغلب به‌صورت کیفی تعریف می‌شوند و تبدیل آن‌ها به مقادیر کمی برای مقایسه و تصمیم‌گیری چالش‌برانگیز است. پیچیدگی روابط میان عوامل اجتماعی، نهادی و منابع آب باعث می‌شود تفسیر نتایج دشوار باشد و سیاست‌گذاری مبتنی بر این شاخص‌ها نیازمند رویکردهای چندبعدی و مشارکتی است (Polonenko et al., 2019; Mirchooli et al., 2021). در نهایت، نبود چارچوب‌های یکپارچه و ضعف در پیوند شاخص‌های اجتماعی-نهادی با شاخص‌های زیست‌محیطی و اقتصادی، کارایی این ابزارها را در مدیریت جامع منابع آب محدود می‌کند.

(e) شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری

کاربرد شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری برای ارزیابی و مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های متعددی روبرو است. نخست، این مناطق به دلیل تغییرات شدید اقلیمی و پراکندگی مکانی بارش،

با نوسانات زیاد در منابع آب مواجه‌اند که باعث می‌شود شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری نیازمند داده‌های دقیق و محلی باشند تا بتوانند تفاوت‌های مکانی و زمانی را به‌درستی منعکس کنند (Xia et al., 2017). دوم، شاخص‌های متداول اغلب به‌خوبی نمی‌توانند تعامل پیچیده بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدروژئولوژیکی (مانند انتقال خشکسالی از بارش به آب زیرزمینی) را نشان دهند و نیاز به شاخص‌های ترکیبی و تحلیل‌های چندمتغیره دارند (Meimandi et al., 2024). سوم، حافظه آبی (مدت زمان تأثیرپذیری منابع آب زیرزمینی از خشکسالی) در چاه‌ها و آبخوان‌ها بسیار متغیر است و این ناهمگونی، ارزیابی تاب‌آوری را دشوار می‌کند (Neves, 2024). چهارم، شاخص‌های ریسک و تاب‌آوری باید بتوانند اثرات فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بیش از حد آب و تغییر کاربری اراضی را نیز لحاظ کنند، در حالی که اغلب مدل‌ها بیشتر بر عوامل طبیعی تمرکز دارند (Lankford et al., 2022; Bonetti et al., 2022). همچنین، نبود داده‌های کافی و قابل اعتماد، ضعف در یکپارچه‌سازی شاخص‌ها با سیاست‌گذاری و مدیریت مشارکتی، و عدم توجه به ابعاد اقتصادی-اجتماعی و زیست‌محیطی از دیگر چالش‌های مهم هستند (Núñez-López et al., 2021). در نهایت، برای افزایش کارایی این شاخص‌ها، باید آن‌ها را با ابزارهای پیش‌بینی اقلیمی، سناریوهای آینده‌نگر و راهکارهای سازگار با شرایط محلی ترکیب کرد تا بتوان تصمیمات مدیریتی مؤثرتری اتخاذ نمود (Xia et al., 2017; Núñez-López et al., 2021).

(f) مدل‌ها

کمبود داده‌های دقیق و کافی برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها، از جمله چالش‌های کاربرد مدل‌های ارزیابی منابع آب در حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که دلیل آن پراکندگی ایستگاه‌های اندازه‌گیری و در مواردی محدودیت منابع مالی و فنی رایج است (Hanson et al., 2022). پیچیدگی رفتار هیدروژئولوژیکی در این مناطق، مانند تغییرات شدید زمانی و مکانی بارش و

نیازمند تخصص فنی و منابع انسانی ماهر است (Hanson et al., 2022). در نهایت، عدم تطابق بین مقیاس کاربری مدل‌سازی و نیازهای واقعی آبخیزنشینان، و همچنین نادیده گرفتن ابعاد اجتماعی-اقتصادی و مشارکت جوامع محلی در بسیاری از مدل‌ها، می‌تواند کارایی آن‌ها را برای مدیریت پایدار منابع آب کاهش دهد (Hanson et al., 2022; Felegari et al., 2024). در جدول ۳، چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد شاخص‌ها، مدل‌ها و چارچوب‌های ارزیابی کفایت منابع آب به طور خلاصه ارائه شده است.

تبخیر، باعث می‌شود مدل‌ها به پارامترهای حساس و تنظیمات دقیق نیاز داشته باشند و عدم قطعیت نتایج افزایش یابد (Nasiri et al., 2020). همچنین، بسیاری از مدل‌ها برای مناطق مرطوب یا کشاورزی توسعه یافته‌اند و ممکن است فرآیندهای خاص مناطق خشک، مانند نفوذپذیری پایین خاک یا تبخیر زیاد، را به خوبی شبیه‌سازی نکنند (Lyra et al., 2021). نیاز به داده‌های ورودی متنوع (مانند کاربری اراضی، پوشش گیاهی و داده‌های هواشناسی) و دشواری جمع‌آوری آن‌ها، محدودیت دیگری است (Lyra et al., 2021; Felegari et al., 2024). علاوه بر این، استفاده از مدل‌های پیچیده

جدول ۳ - چالش‌ها و محدودیت‌های کاربرد روش‌های ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک
Table 3- Challenges and limitations of water resources adequacy evaluation methods in arid and semi-arid watersheds

عنوان چالش	شرح مختصر	منابع منتخب
کمبود و پراکندگی داده‌ها	نبود داده‌های هیدرولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی با دقت زمانی و مکانی کافی	Merz et al., 2014; UNESCO, 2021
ناهمخوانی یا ناکارآمدی شاخص‌ها	عدم تناسب برخی شاخص‌ها با شرایط بومی و اقلیمی مناطق خشک	Loucks & van Beek, 2017; Falkenmark, 1989
ضعف در مدل‌سازی تلفیقی	محدودیت در مدل‌هایی که توان ترکیب شاخص‌های کمی، کیفی، نهادی و بهره‌وری را داشته باشند	He & James, 2021; He et al., 2023
نبود مشارکت محلی در ارزیابی	مشارکت ناکافی آبخیزنشینان در تدوین شاخص‌ها و تصمیم‌گیری‌ها	Pahl-Wostl et al., 2007; Armitage et al., 2012
ضعف ساختار حکمرانی و نهادی	نبود نهادهای هماهنگ‌کننده مؤثر، تعدد متولیان، ضعف قوانین مشارکتی	Mirchi et al., 2012; Yadegari et al., 2018
تأثیرات تغییر اقلیم	تغییر در الگوهای بارش، افزایش خشکسالی و نوسانات منابع آب سطحی و زیرزمینی	Parmesan et al., 2022; Zarch et al., 2015

هستند، ترکیب صحیح شاخص‌های مختلف (کمی، کیفی، بهره‌وری، نهادی-اجتماعی، ریسک و تاب‌آوری) با مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، یا تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند تصویری جامع‌تر و کاربردی‌تر از کفایت منابع آب ارائه دهد. در ادامه رویکردهای ترکیبی رایج در چنین تحلیلی ارائه شده است.

رویکردهای ترکیبی در تحلیل چندبعدی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز

در ارزیابی کفایت منابع آب یک حوزه آبخیز برای پاسخ‌گویی به نیازهای جوامع محلی، استفاده از یک دسته مشخص از شاخص‌ها یا مدل‌ها به تنهایی نمی‌تواند تمامی ابعاد پیچیده اجتماعی-اکولوژیکی سیستم‌های منابع آب را در بر گیرد. به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با محدودیت‌های شدید آبی، نوسانات اقلیمی و ساختارهای نهادی ضعیف مواجه

(a) ترکیب شاخص‌ها در قالب چارچوب‌های تحلیلی

بسیاری از مطالعات تلاش کرده‌اند تا با استفاده از چارچوب‌هایی نظیر ^۱DPSIR، ^۲WEF Nexus یا چارچوب پایداری^۳، شاخص‌های مختلف را به صورت یکپارچه تحلیل کنند (Pires et al., 2017; Kardan Moghadam & Roozbahani, 2022; Parizi et al., 2023). از مهمترین و جامع‌ترین این چارچوب‌ها، رویکرد مدیریت یکپارچه منابع آب^۴ (IWRM) است که به طور خاص برای ادغام این ابعاد و بهبود پایداری و کارایی مدیریت آب توسعه یافته است و شواهد جهانی نشان می‌دهد که اجرای IWRM با بهبود شاخص‌های پایداری محیط‌زیستی، بهره‌وری آب، بهداشت اکوسیستم‌ها و حتی کارایی اقتصادی و اجتماعی مرتبط است، هرچند میزان موفقیت آن به شرایط نهادی و حکمرانی بستگی دارد و در برخی شاخص‌ها مانند کیفیت آب یا استرس آبی، نتایج متغیر بوده است (Hering & Ingold, 2012; Bilalova et al., 2023; Li & Wu, 2023). تمرکز اصلی در این رویکرد بر مدیریت هماهنگ منابع آب، در نظر گرفتن نیازهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی و بهینه‌سازی تخصیص آب در سطح حوضه است، اما به طور سنتی مصرف غیرمستقیم آب مانند آب مجازی یا رد پای آب به طور صریح در مدل‌های IWRM لحاظ نمی‌شود. به طور کلی، اگرچه IWRM ظرفیت و چارچوب لازم برای لحاظ کردن مصرف غیرمستقیم آب را دارد، اما در عمل و در اغلب مطالعات و پیاده‌سازی‌ها، این موضوع کمتر مورد توجه قرار گرفته است و نیازمند توسعه بیشتر مدل‌ها و شاخص‌های ارزیابی است (Wang et al., 2019; Bilalova et al., 2023).

(b) ترکیب شاخص‌ها با مدل‌های شبیه‌سازی

در بسیاری از مطالعات، شاخص‌های کفایت به عنوان متغیرهای هدف یا معیارهای ارزیابی عملکرد، درون مدل‌های شبیه‌سازی جریان آب، کیفیت آب یا بهره‌برداری از منابع گنجانده شده‌اند (Lyra et al., 2021; Li et al., 2024). ترکیب شاخص‌های متنوع با مدل‌های شبیه‌سازی باعث افزایش دقت و جامعیت ارزیابی می‌شود، اما به داده‌های فراوان و تخصص بالا نیاز دارد و ممکن است پیچیدگی و عدم قطعیت را افزایش دهد (Tekle et al., 2024).

(c) ترکیب شاخص‌ها با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

مطالعات متعددی به ترکیب شاخص‌های کمی، کیفی، نهادی-اجتماعی، بهره‌وری، ریسک و تاب‌آوری برای ارزیابی کفایت منابع آب و مدیریت حوزه‌های آبخیز با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۵ (MCDM) پرداخته‌اند. برای مثال، در پژوهشی Tavosi و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های MCDM مانند ^۶VIKOR، ^۷TOPSIS، ^۸SAW، ^۹COPRAS و ^{۱۰}ELECTRE، هشت شاخص اقتصادی، اجتماعی و زیرساختی را برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در حوزه آبخیز گرگانرود ایران به کار برده و نشان دادند که دانش بومی و معیشت‌های وابسته به آب نقش کلیدی در امنیت هیدرولوژیکی حوضه دارند. در مطالعه‌ای دیگر، Lima و همکاران (۲۰۲۱) شاخص‌های کیفیت و کمیت آب زیرزمینی، کاربری اراضی، عدالت و آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان را با ترجیحات دینفعان محلی ترکیب و برای اولویت‌بندی مدیریت آب زیرزمینی در حوزه‌ها استفاده نمودند. همچنین، مدل‌های تصمیم‌گیری

7. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
8. Simple Additive Weighting
9. complex proportional assessment
10. Elimination Et Choix Traduisant la Realité

1. Driver-Pressure-State-Impact-Response
2. Water- Energy- Food Nexus
3. Sustainability Framework
4. Integrated Water Resources Management
5. Multi-Criteria Decision-Making
6. Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje (Best Criteria Optimization Compromise Solution)

چندمعیاره برای ارزیابی گزینه‌های مدیریتی با استفاده از شاخص‌های کمی و کیفی، بهره‌وری، و ابعاد اجتماعی-اقتصادی در حوزه‌های مختلف مانند حوضه گدیز ترکیه و حوزه‌های برزیل و کره جنوبی به کار رفته‌اند (Yılmaz & Harmancioglu, 2010; Kim & Chung, 2014; Silva et al., 2020).

ترکیب شاخص‌های متعدد با مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت منابع آب حوزه آبخیز، باعث افزایش دقت، جامعیت و کارایی تصمیم‌گیری می‌شود، اما چالش‌هایی مانند پیچیدگی، حساسیت به وزن‌دهی و عدم قطعیت داده‌ها را نیز به همراه دارد (Yılmaz & Harmancioglu, 2010).

(d) مدل‌های تلفیقی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی

در سال‌های اخیر، مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به طور گسترده برای ارزیابی و مدیریت منابع آب حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ترکیب شده‌اند. این رویکردها معمولاً با هدف تخصیص بهینه آب بین بخش‌های مختلف (مانند کشاورزی و نیروگاه‌های برق‌آبی) و با در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های منابع انجام می‌شوند. برای مثال، مدل SRIOP^۱ را می‌توان نام برد که توسط Jiang و همکاران (۲۰۲۱) با ترکیب مدل‌های اگروهیدرولوژیک و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، در تخصیص بهینه آب آبیاری در حوزه آبخیز هیهه^۲ چین و با در نظر داشتن تغییرات اقلیمی استفاده گردید. همچنین، Ashu و Lee (۲۰۲۱) برای مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوزه‌های کشاورزی مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری را به کار برده‌اند. در ایران نیز، ترکیب مدل WEAP با الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی بهینه منابع آب در حوزه‌هایی مانند رودخانه کشکان به کار رفته است.

(Hatamkhani & Moridi, 2019). مطالعات دیگری نیز به بهینه‌سازی عملکرد سدها و مخازن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های هوشمند پرداخته‌اند (Saab et al., 2022; Vaz et al., 2024). شایان ذکر است بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیک با الگوریتم‌هایی مانند PSO و بررسی عدم قطعیت ناشی از سطح تقسیم‌بندی حوزه و الگوریتم بهینه‌سازی، نقش مهمی در افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها داشته است (Wang et al., 2024). چنین ترکیبی از مدل‌ها، ابزار قدرتمندی برای تصمیم‌گیری و مدیریت پایدار منابع آب در حوزه‌های آبخیز، به‌ویژه در مناطق با منابع محدود و شرایط اقلیمی متغیر، فراهم می‌کند. بنابر نتایج بررسی، می‌توان گفت در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر فلات مرکزی ایران، ترکیب عوامل اقلیمی، اکولوژیکی و نهادی، استفاده از رویکردهای تلفیقی را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است.

بحث

مرور ادبیات انجام‌شده نشان می‌دهد که ارزیابی کفایت منابع آب در حوزه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک، مستلزم به‌کارگیری طیف وسیعی از شاخص‌ها و مدل‌هاست که در شش دسته اصلی شاخص‌های کمی، شاخص‌های کیفی، شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم آب، شاخص‌های نهادی-اجتماعی و ریسک و تاب‌آوری قابل طبقه‌بندی هستند. از سوی دیگر، مدل‌های مورد استفاده برای ارزیابی نیز در قالب مدل‌های هیدرولوژیکی، تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)، مدل‌های اقتصاد-آب، و شبیه‌سازی سناریوهای تغییرات اقلیم و کاربری زمین دسته‌بندی می‌شوند.

بررسی مطالعات نشان داد که نخست معیارهای کمی از مهم‌ترین ابزارهای سنجش کفایت منابع آب در حوزه‌ها هستند. در مطالعات جامع‌تر، شاخص‌های

Xiang et al., 2021; Bilalova et al., 2023; Li &)
(Wu, 2023; Ahmed et al., 2024

نتیجه‌گیری کلی

این بررسی نشان داد شاخص‌های کمی، کیفی و شاخص‌های بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم آب، هر یک نقش مهمی در تحلیل کفایت منابع ایفا می‌کنند و انتخاب شاخص‌های مناسب باید با توجه به شرایط اقلیمی، اجتماعی و زیست‌محیطی مناطق هدف صورت گیرد. همچنین، مدل‌های تصمیم‌گیری و شبیه‌سازی موجود، ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی و مدیریت منابع آب فراهم می‌آورند.

در نهایت، برای ارتقاء کارایی ارزیابی‌ها، به داده‌های میدانی به‌روز، چارچوب‌های مفهومی منسجم متناسب با منطقه مورد مطالعه با کاربرد صحیح شاخص‌های چندجانبه کمی، کیفی، بهره‌وری و مصرف غیرمستقیم آب، ریسک و تاب‌آوری و شاخص‌های نهادی اجتماعی همراه با همکاری بین‌بخشی، نیاز است. همچنین پژوهش‌های آینده باید به سمت توسعه شاخص‌های پویا و مدل‌های یکپارچه بر اساس داده‌های واقعی حرکت کنند تا بتوانند پاسخگوی نیازهای متغیر آبخیزنشینان در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشند و به امنیت آبی پایدار کمک کنند.

کیفی به‌ویژه برای مطالعات مرتبط با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سویی، شاخص‌های بهره‌وری مانند ردپای آب، آب مجازی، و بهره‌وری اقتصادی- زیست‌محیطی، امکان تحلیل پیوند آب و معیشت در سطوح خرد و کلان را در مطالعات اخیر، فراهم کرده‌اند. در نهایت، شاخص‌های نهادی و تاب‌آوری مانند سطح مشارکت ذی‌نفعان، انعطاف‌پذیری نهادی و ظرفیت تاب‌آوری سیستم‌های محلی، افق جدیدی برای درک پایداری اجتماعی- ساختاری در ارزیابی کفایت آب ایجاد کرده‌اند. از آنجایی که محدودیت‌هایی مانند کمبود داده‌های دقیق، عدم هماهنگی نهادی و چالش‌های محیطی، روند ارزیابی را پیچیده می‌سازد، ترکیب شاخص‌ها و مدل‌ها با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، برای ارائه ارزیابی دقیق‌تر و کاربردی‌تر کفایت منابع آب حیاتی است. به‌علاوه، تاکید بر ابعاد نهادی- اجتماعی، ریسک و تاب‌آوری، به درک عمیق‌تر و جامع‌تر این مسئله کمک می‌کند و زمینه‌ساز توسعه سیاست‌ها و راهبردهای پایدار مدیریت منابع آب می‌شود. در مجموع، اگرچه هنوز چالش‌هایی در ادغام کامل همه این ابعاد وجود دارد، اما رویکردهای نوین و بین‌رشته‌ای، افق‌های جدیدی برای مدیریت جامع و پایدار منابع آب گشوده‌اند

References

- Ababaei, B., & Etedali, H. R. (2017). Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural water management*, 179, 401-411.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.016>
- Ahmadi, A. (2022). The effect of increasing water use efficiency on improving the status of groundwater resources using WEAP model in Qazvin Plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 2(1), 53-62.
<https://doi.org/10.22098/MMWS.2022.9333.1034>
- Ahmadzadeh, H., Mansouri, B., Fathian, F., & Vaheddoost, B. (2022). Assessment of water demand reliability using SWAT and

- RIBASIM models with respect to climate change and operational water projects. *Agricultural Water Management*, 261, 107377.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107377>
- Ahmed, A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., & Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140715.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140715>
- Aliyari, F., Bailey, R., Tasdighi, A., Dozier, A., Arabi, M., & Zeiler, K. (2019). Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins.

- Environmental Modelling & Software*, 115, 200-210.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2019.02.014>
- Alizadeh, A., & Keshavarz, A. (2005). *Status of agricultural water use in Iran. Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian-American Workshop*. National Academies Press. Paris.
- Alizadeh, M., Noori, R., Omidvar, B., Nohegar, A., & Pistre, S. (2024). Human health risk of nitrate in groundwater of Tehran-Karaj plain, Iran. *Scientific Reports*, 14(1), 7830. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58290-6>
- Alsaheed, B., Hunt, D., & Sharifi, S. (2024). A Sustainable Water Resources Management Assessment Framework (SWRM-AF) for Arid and Semi-Arid Regions—Part 1: Developing the Conceptual Framework. *Sustainability*, 16(7), 42. <https://doi.org/10.3390/su16072634>
- Amini, A., Othman, K., Abassi, F., & Booi, M. (2025). Determining virtual water, physical and economic indices to optimize agricultural water consumption in three different climates. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 22(5), 2941-2954. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05967-0>
- Amini, M., Torkan, G., Eslamian, S., Zareian, M. J., & Besalatpour, A. A. (2018). Assessment of SWAT Hydrological Model in Catchments' Water Balance Simulation Located in Semi-Arid Regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin). *Water and Soil*, 32(5), 849-863. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i5.68815> (In Persian)
- Armitage, D., De Loë, R., & Plummer, R. (2012). Environmental governance and its implications for conservation practice. *Conservation letters*, 5(4), 245-255. <https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00238.x>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Asadi, H., Baghani, J., & Rafati, M. (2023). Physical and Economic Productivity of Irrigation Water and Profitability of Some Crop Products in Different Irrigation Systems in Alborz Province of Iran. *Agricultural Economics and Development*, 30(4), 53-72. <https://doi.org/10.30490/aead.2022.354870.1344>
- Ashu, A., & Lee, S. (2021). Simulation-Optimization Model for Conjunctive Management of Surface Water and Groundwater for Agricultural Use. *Water*, 13(23), 3444. <https://doi.org/10.3390/w13233444>
- Basheer, M., & Elagib, N. (2018). Sensitivity of Water-Energy Nexus to dam operation: A Water-Energy Productivity concept. *The Science of the Total Environment*, 616-617, 918-926. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.228>
- Behboudian, M., & Kerachian, R. (2021). Evaluating the resilience of water resources management scenarios using the evidential reasoning approach: The Zarrinehrud river basin experience. *Journal of environmental management*, 284, 112025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112025>
- Bilalova, S., Newig, J., Tremblay-Lévesque, L., Roux, J., Herron, C., & Crane, S. (2023). Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management. *Journal of environmental management*, 343, 118179. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118179>
- Bonetti, S., Sutanudjaja, E., Mabhaudhi, T., Slotow, R., & Dalin, C. (2022). Climate change impacts on water sustainability of South African crop production. *Environmental Research Letters*, 17(8), 084017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac80cf>
- Bortolini, L., Maucieri, C., & Borin, M. (2018). A Tool for the Evaluation of Irrigation Water Quality in the Arid and Semi-Arid Regions. *Agronomy*, 8, 23. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY8020023>
- Cao, X., Cyuzuzo, C., Saiken, A., & Song, B. (2021). A linear additivity water resources assessment indicator by combining water quantity and water quality. *Ecological*

- Indicators, 121, 106990. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.106990>
- Chen, X., Zhao, B., Shuai, C., Qu, S., & Xu, M. (2022). Global spread of water scarcity risk through trade. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106643. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106643>
- Da Cunha E Silva, D., De Oliveira, R., Simonetti, V., Toniolo, B., Sales, J., & Lourenço, R. (2022). Creation of an environmental sustainability index for water resources applied to watersheds. *Environment, Development and Sustainability*, 25, 11285-11305. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02527-9>
- Deltares. (2014). *RIBASIM – User Manual*. Delft, The Netherlands.
- Dogani, A., Dourandish, A., & Ghorbani, M. (2020). Ranking of Resilience Indicators of Mashhad Plain to Groundwater Resources Reduction by Bayesian Best-Worst Method. *Water and Irrigation Management*, 10(2), 301-316. <https://doi.org/10.22059/jwim.2020.303387.803> (In Persian)
- Ebrahimi, A., & Shourian, M. (2022). Quantity–quality-based water allocation programming in a reservoir–river system. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(9), 1016-1027. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.056>
- Ebrahimpour, M., Rahimi, J., Nikkhah, A., & Bazrafshan, J. (2015). Monitoring agricultural drought using the standardized effective precipitation index. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000771](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000771)
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2004). *Balancing water for humans and nature: the new approach in ecohydrology*. Earthscan.
- Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural resources forum*, 13(4), 258-267. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>
- FAO. (2012). *Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security*. FAO Water Reports No. 38.
- FAO. (2018). *Water Accounting for Water Governance and Sustainable Development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.
- Farahza, M. N., Nazari, B., Akbari, M. R., Naeini, M. S., & Liaghat, A. (2020). Assessing the Physical and Economic Water Productivity of Annual Crops in Moghan Plain and Analyzing the Relationship between Physical and Economic Water Productivity. *Irrigation and Water Engineering*, 11(2), 166-179. <https://doi.org/10.22125/iwe.2020.120729>
- Feldman, A. (2000). *HEC-HMS Technical Reference Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Felegari, M., Sadr, M., Abdollahi, S., & Golkarian, H. (2024). Water yield modeling in the watershed: a framework for sustainable water resources management. *Sustainable. Water Resources Management*, 10, 148. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01129-9>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and society*, 15(4), 1-9.
- Ghorbani M, Salari F, Malekian A, Fahmi H. (2015) Analysis of Local Beneficiaries and Social Capital in Water Resources Co-Social Network Management (Case study: Watershed Razin of Kermanshah). *Jwmseir*, 9 (29), 35-46.
- Ghosh, T. (2024). Groundwater hydro-geochemical inferences and explainable Artificial Intelligence augmented groundwater quality prediction in arid and semi-arid segment of Rajasthan, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101272. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101272>
- Gleick, P. H. (1998). Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological applications*, 8(3), 571-579.
- Habibi, S., Khoshravesh, M., & Nouri Khajebelagh, R. (2024). An Investigation on Physical Productivity of Water and Energy Indices in Two Contrasting Climates. *Journal of Water Research in*

- Agriculture*, 38(1), 1-14.
<https://doi.org/10.22092/jwra.2024.363555.1010>
- Hamed, E., Chezgi, J., & Noor, H. (2022). The effect of watershed management scenarios on discharge and sedimentation with SWAT model in arid and semi-arid regions. *Journal of Arid Biome*, 12(2), 1-11.
<https://doi.org/10.29252/aridbiom.2023.20269.1937> (In Persian)
- Hanson, R., Rowan, J., & Green, M. (2022). An assessment of 2 watershed models to meet watershed planning needs. *Lake and Reservoir Management*, 38, 16-27.
<https://doi.org/10.1080/10402381.2021.2007181>
- Hatamkhani, A., & Moridi, A. (2019). Multi-Objective Optimization of Hydropower and Agricultural Development at River Basin Scale. *Water Resources Management*, 33, 4431-4450. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02365-x>.
- He, C., & James, L. (2021). Watershed science: Linking hydrological science with sustainable management of river basins. *Science China Earth Sciences*, 64, 677-690.
<https://doi.org/10.1007/s11430-020-9723-4>
- He, C., Harden, C., Holden, J., & Mdee, A. (2023). Watershed science: Coupling hydrological science and water resources management. *Hydrological Processes*, 37(5), e14889.
<https://doi.org/10.1002/hyp.14889>
- Hejabi, S., & Akhoondzadeh Yousefi, T. (2019). The Relationship between Virtual Water Exports and the Country's Water Resources Inventory. *Iranian Economic Review*, 23(3), 693-713.
<https://doi.org/10.22059/ier.2019.71794>
- Hering, J., & Ingold, K. (2012). Water Resources Management: What Should Be Integrated? *Science*, 336, 1234 - 1235.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1218230>
- Hoekstra, A. Y. (2019). *The water footprint of modern consumer society*. Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780429424557>
- Hoekstra, A., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2012). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature climate change*, 6(2), 166-171.
- Jaber, F., & Shukla, S. (2012). MIKE SHE: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55, 1479-1489.
<https://doi.org/10.13031/2013.42255>
- Jalali, M., Antoniadis, V., & Najafi, S. (2021). Assessment of trace element pollution in northern and western Iranian agricultural soils: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-30.
<https://doi.org/10.1007/s10661-021-09498-w>
- Jalali, M., Jalali, M., & Morrison, L. (2024). Groundwater hydrogeochemical processes, water quality index, and probabilistic health risk assessment in an arid and semi-arid environment (Hamedan, Iran). *Groundwater for Sustainable Development*, 26, 101255.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101255>
- Jiang, Y., Xiong, L., Xu, Z., & Huang, G. (2021). A simulation-based optimization model for watershed multi-scale irrigation water use with considering impacts of climate changes. *Journal of Hydrology*, 598, 126395.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126395>
- Karandish, F., & Hoekstra, A. Y. (2017). Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. *Water*, 9(11), 831.
<https://doi.org/10.3390/w9110831>
- Kardan moghaddam, H., & Roozbahani, A. (2022). Evaluation of DPSIR structure for balancing groundwater resources with multi-criteria decision making and stakeholder participation. *Journal of Aquifer and Qanat*, 3(1), 29-39.
<https://doi.org/10.22077/jaaq.2018.1454.1003> (In Persian)
- Khosravi, M., Zolfaghari, A., Kaboli, S. H., & Ghafari, H. (2022). Investigation of SWAT Model Efficiency in Spatial Analysis of Runoff in Watersheds without Local Soil Data (Case Study: Damghanrood Watershed). *Applied Soil Research*, 10(1), 129-143.
<https://doi.org/10.30466/ASR.2022.121201> (In Persian)
- Kim, Y., & Chung, E. (2014). An index-based robust decision making framework for watershed management in a changing climate. *The Science of the total environment*, 473-474, 88-102.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.002>
- Kiyani Majd, M., Nohtani, M., Dehmardeh Ghaleh, M. R., & Shikh Z. (2023). Simulating the Runoff of Watersheds in Dry Areas on A Monthly Scale using the SWAT Model (Case Study: Lar Watershed). *J Watershed Management Research*, 14(27), 135-145. <https://doi.org/10.61186/jwmr.14.27.135> (In Persian)
- Labadie, John W. (2006). MODSIM: Decision Support System for Integrated River Basin Management. *International Congress on Environmental Modelling and Software*. 242.
- Lankford, B., Pringle, C., McCosh, J., Shabalala, M., Hess, T., & Knox, J. (2022). Irrigation area, efficiency and water storage mediate the drought resilience of irrigated agriculture in a semi-arid catchment. *The Science of the total environment*, 859, 160263. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160263>
- Li, P., & Wu, J. (2023). Water Resources and Sustainable Development. *Water*, 16(1), 134. <https://doi.org/10.3390/w16010134>
- Li, Y., Tan, Q., Wang, X., Li, C., & Fu, Q. (2024). An integrated simulation-optimization modeling approach for coupled risk management of Blue Water and Green Water under changing environmental conditions. *Journal of Cleaner Production*, 478, 143779. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143779>
- Lima, M., Barilari, A., Massone, H., & Pascual, M. (2021). Incorporating local researchers' and decision makers' preferences for groundwater resources management in a spatial multi-voiced decision model. *Journal of environmental management*, 302, 113954. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113954>
- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>
- Luh, J., Baum, R., & Bartram, J. (2013). Equity in water and sanitation: developing an index to measure progressive realization of the human right. *International journal of hygiene and environmental health*, 216(6), 662-671. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.12.007>
- Lyra, A., Loukas, A., Sidiropoulos, P., Tziatzios, G., & Mylopoulos, N. (2021). An Integrated Modeling System for the Evaluation of Water Resources in Coastal Agricultural Watersheds: Application in Almyros Basin, Thessaly, Greece. *Water*, 13(3), 268. <https://doi.org/10.3390/W13030268>.
- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian studies*, 49(6), 997-1016. (In Persian)
- Madani, K. (2010). Game theory and water resources. *Journal of hydrology*, 381(3-4), 225-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.045>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of environmental studies and sciences*, 4, 315-328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Majidi, A., & Shahedi, K. (2012). Simulation of rainfall-runoff process using Green-Ampt method and HEC-HMS model (Case study: Abnama Watershed, Iran). *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1), 5-9. <https://doi.org/10.5923/j.ijhe.20120101.02>
- Mansir, I., Bouchaou, L., Chebli, B., Brahim, Y., & Choukr-Allah, R. (2021). A specific indicator approach for the assessment of water resource vulnerability in arid areas: the case of the Souss-Massa Region (Morocco). *Hydrological Sciences Journal*, 66, 1151-1168. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1924379>
- Mardani, M., Ziaei, S., & Nikouei, A. (2018). Optimizing the Trade of Virtual Water in Regional Cropping Pattern of the Isfahan Province: Application of Multi-Criteria Models. *Agricultural Economics and Development*, 25(4), 39-88. <https://doi.org/10.30490/aead.2018.60994>
- Marston, L., Lamsal, G., Ancona, Z., Caldwell, P., Richter, B., Ruddell, B., Rushforth, R., & Davis, K. (2020). Reducing water scarcity by improving water productivity in the United States. *Environmental Research*

- Letters, 15(9), 094033. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9d39>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Mehta, L., Movik, S., & Manzungu, E. (2017). *Flows and Practices: The Politics of Integrated Water Resources Management in Eastern and Southern Africa*. African Books Collective.
- Meimandi, J., Bazrafshan, O., Esmailpour, Y., Zamani, H., & Shekari, M. (2024). Risk assessment of meteo-groundwater drought using copula approach in the arid region. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02641-8>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption*. UNESCO-IHE Report Series.
- Merz, B., Aerts, J. C. J. H., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., ... & Nied, M. (2014). Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), 1921-1942. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
- Milly, P. C., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- Mirchi, A., Madani, K., Watkins, D., & Ahmad, S. (2012). Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water resources management*, 26, 2421-2442. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0024-2>
- Mirchooli, F., Sadeghi, S., Darvishan, K., & Strobl, J. (2021). Multi-dimensional assessment of watershed condition using a newly developed barometer of sustainability. *The Science of the total environment*, 791, 148389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148389>
- Mohammadi Arasteh, S., & Shoaee, S. M. (2023). A comprehensive review of the salinity assessment in groundwater resources of Iran. *Acta Geophysica*, 72(1), 385-403. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01047-y>
- Mohsenizadeh, E., & Shourian, M. (2018). Basin Scale Optimum Water Resources Allocation Planning by Coupling Modsim and Cuckoo Optimization Algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 13(4), 1-16. (In Persian)
- Molden, D. (2013). *Water for food water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. Routledge.
- Nasiri, S., Ansari, H., & Ziaei, A. (2020). Simulation of water balance equation components using SWAT model in Samalqan Watershed (Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05366-y>
- Neves, M. (2024). Integrating Standardized Indices and Performance Indicators for Better Drought Assessment in Semi-Arid Coastal Aquifers. *Groundwater for Sustainable Development*. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101341>
- Norouzi, N. (2022). Presenting a conceptual model of water-energy-food nexus in Iran. *Current Research in Environmental Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100119>
- Núñez-López, J., Cansino-Loeza, B., Sánchez-Zarco, X., & Ponce-Ortega, J. (2021). Involving resilience in assessment of the water-energy-food nexus for arid and semiarid regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24, 1681 - 1693. <https://orcid.org/0000-0002-3375-0284>
- OECD. (2015). *OECD Principles on Water Governance*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/gov/regional-policy/OECD-Principles-on-Water-Governance.pdf>
- Ozelik, N., Rodríguez, M., Sartal, A., & Lutter, S. (2024). Taking away the economic “water productivity” illusion: An indicator inapt to inform meaningful water policies. *Ecological Indicators*, 165, 112220. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112220>

- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D., & Taillieu, T. (2007). Social learning and water resources management. *Ecology and society*, 12(2), 19.
<https://doi.org/10.5751/es-02037-120205>
- Panahi, G., Eskafi, M., Rahimi, H., Faridhosseini, A., & Tang, X. (2021). Physical-chemical evaluation of groundwater quality in semi-arid areas: case study—Sabzevar plain, Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 7.
- Pandey, S., Mohapatra, G., & Arora, R. (2023). Groundwater quality, human health risks and major driving factors in arid and semi-arid regions of Rajasthan, India. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139149
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139149>
- Parizi, E., Hosseini, S. M., & Sadeghi, A. (2023). Assessing the Sustainability of Groundwater Resource Management for Aquifers in Iran's Central Plateau Basin. *Iran-Water Resources Research*, 19(3), 136-153.
- Parmesan, C., Morecroft, M. D., & Trisurat, Y. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability, Doctoral dissertation, GIEC.
- Pashahkha, P., Babazadeh, H., Shahmohammadi-Kalalagh, S., & Sarai-Tabrizi, M. (2022). Salinity-based spatial evaluation of groundwater quality for agricultural use. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(7), 6833-6844.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-844577/v1>
- Pires, A., Morató, J., Peixoto, H., Botero, V., Zuluaga, L., & Figueroa, A. (2017). Sustainability Assessment of indicators for integrated water resources management. *The Science of the total environment*, 578, 139-147.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.217>
- Polonenko, L., Hamouda, M., & Mohamed, M. (2020). Essential components of institutional and social indicators in assessing the sustainability and resilience of urban water systems: Challenges and opportunities. *The Science of the total environment*, 708, 135159.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135159>
- Prucha, B., Graham, D., Watson, M., Avenant, M., Esterhuyse, S., Joubert, A., Kemp, M., King, J., Roux, P., Redelinghuys, N., Rossouw, L., Rowntree, K., Seaman, M., Sokolic, F., Rensburg, L., Waal, B., Tol, J., & Vos, T. (2016). MIKE-SHE integrated groundwater and surface water model used to simulate scenario hydrology for input to DRIFT-ARID: The Mokolo River case study. *Water SA*, 42, 384-398.
<https://doi.org/10.4314/WSA.V42I3.03>
- Qasemipour, E., Tarahomi, F., Pahlow, M., Malek Sadati, S. S., & Abbasi, A. (2020). Assessment of Virtual Water Flows in Iran Using a Multi-Regional Input-Output Analysis. *Sustainability*, 12(18), 7424.
<https://doi.org/10.3390/su12187424>
- Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Shooshtari, S. J., & Parteli, E. J. (2022). Long-term assessment of land-use and climate change on water scarcity in an arid basin in Iran. *Ecological Modelling*, 467, 109934.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109934>
- Rahaman, M. M., & Varis, O. (2005). Integrated water resources management: evolution, prospects and future challenges. *Sustainability: science, practice and policy*, 1(1), 15-21.
<https://doi.org/10.1080/15487733.2005.11907961>
- Ramroodi, H., Ajdari Moghadam, M. (2014). *Investigating the integrated water resources management using the WEAP model in southern Balochistan (Study area of Pirsohrab- Oraki basin)*, 8th National Civil Engineering Congress, Civil Engineering Faculty, Babol. (In Persian)
- Ruddell, B., & Rushforth, R. (2024). Water productivity is in the eye of the beholder: benchmarking the multiple values produced by water use in the Phoenix metropolitan area. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28, 1089-1106.
<https://doi.org/10.5194/hess-28-1089-2024>
- Saab, S., Othman, F., Tan, C., Allawi, M., & El-Shafie, A. (2022). Review on generating optimal operation for dam and reservoir water system: simulation models and optimization algorithms. *Applied Water Science*, 12, 73.
<https://doi.org/10.1007/s13201-022-01593-8>
- Sadat-Noori, S. M., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. M. (2014). Groundwater quality assessment

- using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3827-3843. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8>
- Sadeghi, S., Moghadam, E., Delavar, M., & Zarghami, M. (2020). Application of water-energy-food nexus approach for designating optimal agricultural management pattern at a watershed scale. *Agricultural Water Management*, 233, 106071. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106071>
- Sayad, d., Ghazavi, R., Omidvar, A. (2020). Evaluation of the efficiency of SWAT model in estimating daily discharges of no gauge basins with zoning approach in arid regions. *Hydrogeomorphology*. 7(25), 161-182. <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.43934.1568> . (In Persian)
- SEI. (2015). *WEAP: Water Evaluation and Planning System User Guide*. Stockholm Environment Institute.
- Silva, D., Chaves, H., Curi, W., Baracuh, J., & Cunha, T. (2020). Application of the watershed sustainability index in the Piranhas-Açu watershed. *Water Policy*, 22(4), 622-640. <https://doi.org/10.2166/wp.2020.011>
- Singhal, A., Gupta, R., Singh, A., & Shrinivas, A. (2020). Assessment and monitoring of groundwater quality in semi –arid region. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100381. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100381>
- Sodori, M., Janatrostami, S., & Mohammadi, K. (2024). Evaluation of MIKE SHE and MIKE 11 Models for Simulating the Hydrology of Surface Water and Groundwater in the Foumanat Plain Aquifer. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(3), 165-174. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i3.2405-1327>
- Tekle, S., Bonaccorso, B., & Naim, M. (2025). Simulation-based Optimization of Water Resource Systems: A Review of Limitations and Challenges. *Water Resources Management*, 39, 579-602. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-04025-1>
- Tavosi, M., Vafakhah, M., Sadeghi, S., & Bateni, S. (2024). Sub-watershed Prioritization Based on Watershed Hydrological Security Using Different Multi-Criteria Decision-Making Methods. *Water Resources Management*, 39, 65-90. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03957-y>
- Thomas, B. F., Caineta, J., & Nanteza, J. (2017). Global assessment of groundwater sustainability based on storage anomalies. *Geophysical Research Letters*, 44(22), 11-445
- Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of water resources*, 1(3), 34-38.
- UNEP. (2016). *A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a global assessment*. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. 162pp.
- UNESCO. (2021). *The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*. UNESCO, <https://doi.org/10.18356/9789214030140>
- Van der Zaag, P., & Savenije, H. H. (2006). *Water as an economic good: the value of pricing and the failure of markets* (pp. 1-32). UNESCO-IHE.
- Vaz, T., Oliveira, B., & Brandão, L. (2024). Optimisation for operational decision-making in a watershed system with interconnected dams. *Applied Energy*, 367, 123385. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123385>
- Vorosmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. B. (2000). Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *science*, 289(5477), 284-288.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 9(2), 5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Wang, K., Davies, E., & Liu, J. (2019). Integrated water resources management and modeling: A case study of Bow river basin, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 2040, 118242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118242>

- Wang, L., Jie, F., & He, B. (2024). Changes of blue and green water in arid inland dissipation area based on coupled surface water and groundwater model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 56, 102010. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.102010>
- Wang, Z., & Wang, Y. (2023). Groundwater quality assessment by multi-model comparison: a comprehensive study during dry and wet periods in semi-arid regions. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 51571-51594. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25937-2>
- Wang, Z., Zhang, X., Liu, C., Ren, L., Cai, X., & Li, K. (2024). Hydrological Simulation and Parameter Optimization Based on the Distributed Xin'anjiang Model and the Particle Swarm Optimization Algorithm: A Case Study of Xunhe Watershed in Shandong, China. *Water*, 16(22), 3168. <https://doi.org/10.3390/w16223168>
- Wurbs, R. A. (1993). Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of water resources planning and management*, 119(4), 455-472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1993\)119:4\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:4(455))
- WWAP. (2018). *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. UNESCO, Paris.
- Xia, J., Ning, L., Wang, Q., Chen, J., Wan, L., & Hong, S. (2017). Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of West China under a scenario of climate change. *Climatic Change*, 144, 549-563. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1709-y>
- Xiang, X., Li, Q., Khan, S., & Khalaf, O. (2021). Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106515. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106515>
- Xu, W., Kong, Y., Proverbs, D., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2022). A Water Resilience Evaluation Model for Urban Cities. *Water*, 14(12), 1942. <https://doi.org/10.3390/w14121942>
- Yadegari, A., Yousefi, A., & Amini, A. (2018). Institutional Analysis of Water Governance Structure in Iran: A Case of Zayande-Rood Basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 184-197.
- Yan, N., Wu, B., & Zhu, W. (2020). Assessment of Agricultural Water Productivity in Arid China. *Water*, 12(4), 1161. <https://doi.org/10.3390/w12041161>
- Yan, Y., Liu, Z., Chen, X., & Huang, L. (2024). Stability of water yield in watersheds. *Science China Earth Sciences*, 67, 483-496. <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1206-4>
- Yaraghi Fard M, Bidhendi M S. (2023). *Investigating Strategies for the Resilience of Water Resources in the Zayandeh River Watershed*, The 7th National Conference on Protection of Natural Resources and Environment. Ardebil. (In Persian)
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. *Water international*, 30(4), 487-500.
- Yılmaz, B., & Harmancioglu, N. (2010). Multi-criteria decision making for water resource management: a case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water SA*, 36, 563-576. <https://doi.org/10.4314/WSA.V36I5.61990>
- Zallaghi, E., Akhoond-Ali, A. M. and Ashrafi, S. M. (2020). Developing Concept of Water-energy Productivity to Evaluate Dez Dam Operation. *Journal of Hydraulic Structures*, 6(4), 1-15. <https://doi.org/10.22055/jhs.2021.36362.1157>
- Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of hydrology*, 526, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.071>
- Zare, M., Pakparvar, M., Jamshidi, S., Bazrafshan, O., & Ghahari, G. (2021). Optimizing the Runoff Estimation with HEC-HMS Model Using Spatial Evapotranspiration by the SEBS Model. *Water Resources Management*, 35, 2633 - 2648. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02855-x>