

Review Article



Evaluating unconventional water resources for sustainable water supply: Advantages, limitations and implementation strategies

Farida Iraj^{*}, Payam Najafi

Water Studies Research Center, Isf.C., Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author email: f.iraji@khuisf.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 26 Feb 2025

Revised: 30 Apr 2025

Accepted: 02 Jun 2025

Published: 04 Jun 2025

Extended Abstract

Introduction

With global population growth, industrial development, and the consequences of climate change, freshwater resources in many regions of the world have experienced a significant decline. According to reputable international reports, over two billion people live in areas with severe water stress. This crisis has made the search for alternative water sources and the intelligent management of water reserves a top priority. In this context, Unconventional Water Resources (UWRs) have emerged as a strategic solution to address water scarcity. These resources encompass a wide range of technologies and methods that enable the utilization of non-traditional water sources. Despite their high potential, numerous challenges—including technical limitations, high costs, and social resistance—have hindered their development. This study aims to provide a comprehensive analysis of the advantages, limitations, and implementation strategies of UWRs, systematically examining these resources under four main categories: atmospheric water, processed water, transferred water, and unconventional groundwater.

Materials and Methods

This research employs a systematic review and qualitative content analysis to examine the existing literature on UWRs. Data were collected from reputable international databases (Scopus, Web of Science, Science Direct) and Persian databases (Sid, Magiran, Civilica). Search keywords included core concepts related to UWRs, associated technologies, and implementation challenges. Article selection criteria were based on a defined timeframe (1998–2025) and thematic scope (technologies, challenges, socio-economic and environmental dimensions). A two-stage screening process was applied: the first stage involved title and abstract screening, while the second stage assessed full-text articles. Ultimately, 41 studies with robust methodological quality were selected for final analysis. Extracted data included the type of UWR, study region, key findings, advantages, and limitations. Findings were synthesized through comparative tables and analytical evaluation.

Results and Discussion

The findings revealed that UWRs can be classified into four main categories: atmospheric water (including fog/dew harvesting, cloud seeding, and rainwater collection), processed water (desalinated water, treated wastewater, greywater, and agricultural drainage water), transferred water (glacial meltwater and virtual water), and unconventional groundwater (artificial aquifer recharge and fossil water). The optimal choice of resource depends on factors such as sustainability, cost, environmental considerations, and geographical conditions. Resources like rainwater and greywater are more sustainable due to their renewability and low operational costs, whereas advanced technologies like desalination require significant investment. Major challenges include technical limitations, high costs, social resistance, and governance barriers. However, technological advancements (e.g., nanofiltration), smart policymaking, and community engagement can help overcome these obstacles. In Iran, successful experiences with treated wastewater and atmospheric moisture extraction demonstrate the high potential of these resources. Additionally, decentralized treatment systems and salinity-adapted agriculture can enhance the efficiency of UWR utilization.



Conclusion

This study demonstrates that UWRs can play a vital complementary role in ensuring water security. Successful management of these resources requires a fundamental shift in water governance—transitioning from centralized approaches to participatory models involving the private sector and local communities. Key strategies include developing low-cost indigenous technologies, establishing flexible standards, implementing educational programs, and creating long-term monitoring systems. Ultimately, the intelligent integration of UWRs into an Integrated Water Resources Management (IWRM) framework can ensure water sustainability amid climate change and population growth. Future research should focus on cost-effective technologies, lifecycle assessments, and international collaborations.

Keywords: Unconventional water resources, Sustainable water management, Desalination, Treated wastewater, Climate change, Water security

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Farida Iraj: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection; **Payam Najafi:** Supervision, Editing, Methodology, and Validation.

Citation: Iraj, F., & Najafi, P. (2025). Evaluating unconventional water resources for sustainable water supply: Advantages, limitations and implementation strategies. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 1-20. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1206427>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف در تأمین پایدار آب: مزایا، محدودیت‌ها و راهکارهای اجرایی

فریدا ایرجی*، پیام نجفی

مرکز تحقیقات مطالعات آب، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: f.iraji@khuif.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

چکیده

با توجه به افزایش جمعیت جهانی، توسعه صنعتی و تغییرات اقلیمی، منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان با کاهش چشمگیری مواجه شده‌اند. منابع آب نامتعارف (UWRs) به عنوان راهکاری استراتژیک برای مقابله با کمبود آب مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مطالعه با استفاده از روش مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی، به بررسی ۱۲ منبع آب نامتعارف در چهار گروه اصلی (آب جوی، آب پردازش‌شده، آب انتقال‌یافته و آب زیرزمینی نامتعارف) و مطالعات کلیدی در این زمینه پرداخته است. یافته‌ها نشان داد که انتخاب مناسب‌ترین منبع آب نامتعارف به عواملی مانند پایداری، هزینه، ملاحظات محیط‌زیستی و شرایط جغرافیایی بستگی دارد. منابعی مانند آب باران، آب خاکستری و آب شبنم به دلیل تجدیدپذیری و هزینه پایین، گزینه‌های پایدارتری هستند، درحالی‌که فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند نمک‌زدایی و استخراج آب‌های فسیلی نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی می‌باشند. چالش‌های اصلی شامل محدودیت‌های فنی، هزینه‌های بالا، مقاومت اجتماعی و موانع مدیریتی است، اما پیشرفت‌های فناورانه، سیاست‌گذاری هوشمند و مشارکت محلی می‌توانند به غلبه بر این چالش‌ها کمک کنند. در ایران، تجربیات موفق در استفاده از پساب تصفیه‌شده، استحصال رطوبت هوا و پرورش آبزیان با آب‌های شور، نشان‌دهنده پتانسیل بالای این منابع است. نتیجه‌گیری کلی این مطالعه تأکید بر لزوم مدیریت یکپارچه منابع آب نامتعارف در کنار منابع متعارف، با رویکردی تطبیقی و مبتنی بر شرایط محلی دارد تا امنیت آبی پایدار در آینده تضمین شود.

واژه‌های کلیدی: منابع آب نامتعارف، مدیریت پایدار آب، نمک‌زدایی، پساب تصفیه‌شده، تغییرات اقلیمی، امنیت آبی

استناد: ایرجی، ف. و نجفی، پ. (۱۴۰۴). بررسی کاربرد منابع آب نامتعارف در تأمین پایدار آب: مزایا، محدودیت‌ها و راهکارهای اجرایی. *راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی*، ۳(۱): ۱-۲۰. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1206427>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

با توجه به رشد فزاینده جمعیت جهانی، توسعه سریع صنایع و پیامدهای نگران کننده تغییرات اقلیمی، منابع آب شیرین در بسیاری از مناطق جهان با کاهش چشمگیری مواجه شده‌اند. بر اساس گزارش‌های معتبر بین‌المللی، بیش از دو میلیارد نفر از جمعیت جهان در مناطقی زندگی می‌کنند که با تنش آبی شدید مواجه هستند (UN-Water, 2021). این وضعیت بحرانی، ضرورت جستجوی منابع آب جایگزین و مدیریت هوشمندانه ذخایر آبی موجود را به یکی از اولویت‌های اصلی جامعه جهانی تبدیل کرده است. در این میان، آب‌های نامتعارف ($UWRs^1$) به عنوان راهکاری استراتژیک و نویدبخش برای مقابله با چالش کمبود آب مورد توجه قرار گرفته‌اند (Gosling & Arnell, 2016; Yazdandoost et al., 2021). آب‌های نامتعارف به منابع آبی اطلاق می‌شوند که به دلایل مختلف کیفی یا کمی، به صورت سنتی در مصارف انسانی، کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و برای بهره‌برداری نیازمند فرآیندهای پیشرفته تصفیه و آماده‌سازی هستند (Odendaal, 2009). این منابع معمولاً از طریق روش‌های متداول استحصال آب مانند برداشت از منابع سطحی یا زیرزمینی در دسترس مصرف‌کنندگان قرار نمی‌گیرند (Indelicato et al., 1993; Haddad & Mizyed, 2004; Pereira et al., 2009). مفهوم آب‌های نامتعارف در طول چند دهه اخیر تحولات معنایی قابل توجهی را تجربه کرده است. در دهه ۱۹۹۰، این اصطلاح عمدتاً به منابع آبی با ویژگی‌های خاص مانند محتوای بالای مواد آلی، آلاینده‌های میکروبیولوژیکی یا غلظت زیاد املاح اشاره داشت که پیش از استفاده نیاز به فرآیندهای تصفیه پیشرفته داشتند (Indelicato et al., 1993). در اوایل قرن بیست و یکم، با گسترش فناوری‌های نوین، تعریف این منابع توسعه یافت و سیستم‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی آب باران نیز به فهرست آب‌های نامتعارف اضافه شدند (Jaber & Mohsen, 2001). Buchholz, 2008) در مطالعات خود دامنه تعریف آب‌های نامتعارف را به منابعی همچون آب شور، آب لب‌شور، زه‌آب کشاورزی، فاضلاب تصفیه‌شده و آب استحصال‌شده از طریق روش‌های نوین مانند جمع‌آوری مه، اصلاح آب‌وهوا و برداشت آب باران گسترش داد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران این حوزه تعریف جامع‌تری ارائه کرده‌اند که بر اساس آن، هر منبع آبی غیر از آب شیرین متعارف که برای بهره‌برداری نیازمند فناوری‌های پیشرفته باشد، در زمره آب‌های نامتعارف قرار می‌گیرد (Murad, 2014; Negm et al., 2018; Ji et al., 2020). فناوری‌های تولید آب نامتعارف شامل طیف متنوعی از روش‌ها و رویکردهای نوآورانه است که امکان بهره‌برداری از منابع غیرسنتی آب را فراهم می‌کنند. اگرچه آب‌های نامتعارف امکانات امیدوارکننده‌ای را برای غلبه بر بحران کم‌آبی ارائه می‌دهند، اما بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که دانش کنونی در این زمینه هنوز ناقص است و این منابع با محدودیت‌های متعددی روبرو هستند. مهم‌ترین این محدودیت‌ها شامل عوامل جغرافیایی، اقلیمی، اقتصادی و سیاسی می‌باشد که باعث شده‌اند کاربرد آب‌های نامتعارف در بسیاری از مناطق جهان همچنان محدود باقی بماند. از نظر جغرافیایی، دسترسی به برخی از این منابع مانند آب‌های فسیلی یا یخچال‌های طبیعی به مکان‌های خاصی محدود است. از جنبه اقلیمی، کارایی بسیاری از فناوری‌های استحصال آب نامتعارف مانند جمع‌آوری مه یا بارورسازی ابرها به شرایط جوی منطقه وابسته است. چالش‌های اقتصادی نیز از موانع اصلی توسعه این منابع محسوب می‌شوند، چرا که بسیاری از فناوری‌های مرتبط با آب‌های نامتعارف نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه سنگین و هزینه‌های عملیاتی بالا هستند. علاوه بر این، موانع سیاسی و قانون‌گذاری نیز می‌توانند توسعه این منابع را با مشکل مواجه سازند. با وجود تمام چالش‌های مذکور، آب‌های نامتعارف به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب در قرن بیست و یکم شناخته می‌شوند. این منابع به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود شدید آب مواجه هستند، می‌توانند نقش حیاتی در تأمین امنیت آبی ایفا کنند. ادغام هوشمندانه آب‌های نامتعارف در سیستم‌های مدیریت یکپارچه منابع آب ($IWRM^2$) و توسعه فناوری‌های

¹ Unconventional Water Resources² Integrated Water Resources Management

مقرون به صرفه و کارآمد در این زمینه، از جمله راهکارهای کلیدی برای غلبه بر بحران جهانی آب محسوب می‌شوند. هدف از مطالعه حاضر، بررسی انواع منابع آب نامتعارف، مزایا و محدودیت‌های آنها و مرور نظام‌مند مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه است تا با بررسی مقایسه‌ای امکان درک بهتر قابلیت‌ها و چالش‌های هر یک از روش‌های استحصال و استفاده از منابع آب نامتعارف فراهم شود.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق با به کارگیری روش مرور نظام‌مند و تحلیل محتوای کیفی به بررسی جامع پیشینه مربوط به منابع آب نامتعارف پرداخته شد. فرآیند تحقیق با جستجوی نظام‌مند در پایگاه‌های داده معتبر بین‌المللی شامل Scopus، Web of Science، Science Direct و Google Scholar و همچنین پایگاه‌های اطلاعاتی فارسی مانند Sid، Magiran و Civilica آغاز شد. کلیدواژه‌های جستجو در دو زبان انگلیسی و فارسی شامل مفاهیم اصلی مرتبط با منابع آب نامتعارف، فناوری‌های مرتبط و چالش‌های موجود انتخاب گردید. معیارهای انتخاب مقالات بر اساس محدوده زمانی (۱۹۹۸-۲۰۲۵) با تمرکز بر دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۳ و حوزه محتوایی مرتبط با فناوری‌ها و چالش‌های منابع آب نامتعارف و ابعاد اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی تعیین شد. فرآیند غربالگری در دو مرحله انجام گرفت مرحله اول: غربالگری بر اساس عنوان و چکیده (حذف مقالات نامرتبط)، مرحله دوم: بررسی متن کامل مقالات باقیمانده (حذف مطالعات با روش‌شناسی ضعیف یا داده‌های ناکافی). در نتیجه مقالات با کیفیت روش‌شناختی مناسب برای تحلیل نهایی باقی ماندند. داده‌های استخراج شده از مقالات شامل نوع منبع آب نامتعارف، منطقه مورد استفاده، نتایج کلیدی، مزایا و محدودیت‌ها و دسته بندی موضوعی برای هر مقاله بود. ترکیب یافته‌ها از طریق تهیه جداول مقایسه‌ای، تحلیل تطبیقی چالش‌ها در مناطق مختلف و توسعه چارچوب مفهومی یکپارچه انجام شد. این مطالعه با محدودیت‌هایی از جمله عدم دسترسی به برخی مطالعات منطقه‌ای به زبان‌های دیگر و تفاوت در استانداردهای گزارش‌دهی بین مطالعات مواجه بود. این روش‌شناسی جامع امکان ارائه تحلیلی نظام‌مند از وضعیت فعلی دانش در حوزه منابع آب نامتعارف و شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی را فراهم ساخت.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، ۱۲ منبع آب نامتعارف براساس تقسیم‌بندی (Karimidastenaie et al., 2022) بررسی شدند. (Karimidastenaie et al., 2022) منابع آب نامتعارف را در چهار گروه اصلی ذیل دسته‌بندی کردند:

آب جوی: شامل آب مه، شبنم، بارورسازی ابرها و جمع‌آوری آب باران.

آب پردازش‌شده: شامل آب شیرین‌شده، پساب تصفیه‌شده، آب خاکستری و آب زهکشی کشاورزی.

آب انتقال‌یافته: شامل آب کوه‌های یخی و آب مجازی.

آب زیرزمینی نامتعارف: شامل تغذیه مصنوعی سفره‌های آب و آب فسیلی.

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف استفاده از این منابع (از نظر مزایا، محدودیت‌ها و نمونه کاربرد جهانی) ارائه شد. این مقایسه به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا مناسب‌ترین روش را بر اساس شرایط محلی انتخاب کنند.

۳-۱- بررسی منابع آب نامتعارف

۳-۱-۱- آب مه

آب مه به عنوان یکی از اشکال بارش غیربارانی، شامل قطرات معلق آب و رطوبت موجود در جو یا نزدیک سطح زمین است که در مناطق مستعد مه به عنوان یک منبع آب نامتعارف باکیفیت قابل دسترس است. این منبع، جزء مهمی از چرخه آب در مناطق

کم‌آب محسوب می‌شود. برداشت مه با استفاده از تورهای ویژه در مناطق کوهستانی و مه‌خیز امکان‌پذیر است. این روش انرژی کمتری نیاز دارد، اما تولید فصلی و نیاز به نگهداری از معایب آن است (Schemenauer & Cereceda, 1991; Fesshaye et al., 2014).

۳-۱-۲- آب شبنم

آب شبنم یک پدیده هواشناسی است که به طور گسترده در سراسر جهان رخ می‌دهد. این منبع آب نامتعارف و قابل شرب، از رطوبت جو تشکیل می‌شود که بر روی سطوح سرد به صورت قطرات مایع تبدیل می‌شود (Beysens, 2006). شبنم به عنوان منبعی تجدیدپذیر و کم‌هزینه برای مصارف آشامیدنی در مناطق خشک مطرح است. با این حال، وابستگی به شرایط جوی و بازده کم، استفاده گسترده از آن را محدود می‌کند (Beysens, 2006; Kaseke & Wang, 2018).

۳-۱-۳- بارورسازی ابرها

بارورسازی ابرها یک فناوری برای تغییر مقدار، شدت و حتی نوع بارش با استفاده از روش‌های اصلاح آب‌وهواست. این روش با تزریق مواد شیمیایی مانند یدید نقره به ابرها، بارش را تحریک می‌کند. فرآیندهای باروری ابرها شامل روش‌های پرتاب موشک، روش‌های هوایی و ژنراتورهای زمینی است. برای بهبود فرآیند برخورد-ادغام در ابرهای گرم، مواد بارورکننده می‌توانند به عنوان هسته‌های تراکم ابر عمل کنند یا به عنوان هسته‌های یخ باعث تبدیل آب مایع به بلورهای یخ شده و فرآیندهای رسوب بخار، یخ‌زایی و تجمع را در ابرهای فوق‌سرد تقویت کنند (Jensen & Lee, 2008). محدودیت‌های اصلی شامل افزایش حداکثر ۱۰-۱۲ درصد بارش و چالش‌های سیاسی بین‌کشوری است (Talabi & Pourmohammadi, 2016). آب حاصل از بارورسازی ابرها را می‌توان به عنوان یک منبع آب نامتعارف باکیفیت در نظر گرفت.

۳-۱-۴- جمع‌آوری آب باران

جمع‌آوری آب باران یک روش سنتی و رایج در سطح جهانی است که برای مصارف خانگی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و کشاورزی در مقیاس کوچک، به ویژه در کشاورزی دیم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Toosi et al., 2020). با توجه به کمبود بارندگی و توزیع نامناسب مکانی-زمانی آن، سیستم‌های جمع‌آوری آب باران به عنوان یکی از منابع آب نامتعارف در مناطق خشک و نیمه‌خشک کاربرد دارند (Rahaman et al., 2019). سادگی اجرا و هزینه کم از مزایای آن است، اما وابستگی به الگوی بارش از محدودیت‌های آن محسوب می‌شود (Ngigi, 2003; Zhang et al., 2020).

۳-۱-۵- آب شیرین‌کن‌ها

نمک‌زدایی از آب دریا یا آب‌های شور منبعی پایدار برای تأمین آب شیرین است، اما هزینه‌های بالا و تولید شورابه از چالش‌های اصلی آن محسوب می‌شود (Jones et al., 2019). هدف از سیستم‌های نمک‌زدایی، پاکسازی و تصفیه آب دریا یا آب لب‌شور، تأمین آبی است که میزان کل مواد جامد محلول (TDS) آن در حد مجاز کمتر از ۵۰۰ ppm باشد. این فرآیند از طریق روش‌های مختلف نمک‌زدایی انجام می‌شود (Ghafoor et al., 2020). این روش فقط برای کشورهای ثروتمند مقرون به صرفه است. کشورهایی مانند عربستان سعودی پیشرو در این فناوری هستند.

۳-۱-۶- پساب تصفیه‌شده

پساب به هر منبع آبی اطلاق می‌شود که در اثر فعالیت‌های انسانی شامل صنعتی، کشاورزی، تجاری و خانگی آلوده شده باشد. امروزه پساب تصفیه‌شده به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب نامتعارف شناخته می‌شود (Almanaseer et al., 2020). کاربردهای پساب تصفیه‌شده شامل کشاورزی (آبیاری محصولات)، آبیاری فضای سبز شهری، مصارف صنعتی است. این منبع به

ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود آب مواجه هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Adewumi et al., 2010; Baawain et al., 2010) پذیرش اجتماعی و هزینه‌های تصفیه از چالش‌های اصلی آن است (Adewumi et al., 2010; Karimidastenaie et al., 2022)

۳-۱-۷- آب خاکستری

آب خاکستری به پساب خانگی گفته می‌شود که از تمام فاضلاب‌های خانگی مانند آب‌های مصرفی در وان حمام، روشویی، دوش، ماشین‌های لباسشویی، سینک آشپزخانه یا ماشین ظرفشویی تولید می‌شود و شامل آب سرویس‌های بهداشتی نمی‌گردد (Boano et al., 2020). در مناطق کم‌آب، آب خاکستری تصفیه‌شده می‌تواند به عنوان یک منبع آب نامتعارف برای مصارف غیرشرب مورد استفاده قرار گیرد و از فشار بر منابع آبی بکاهد. با این حال، تصفیه آب خاکستری نیازمند فناوری‌های پیشرفته برای حذف آلاینده‌ها است (Patel et al., 2020).

۳-۱-۸- آب زهکشی کشاورزی

آب زهکشی کشاورزی به آب‌های سطحی و زیرسطحی طبیعی یا مصنوعی گفته می‌شود که به عنوان آب مازاد از مناطق کشاورزی خارج می‌شود و می‌توان آن را به عنوان یک منبع آب نامتعارف در نظر گرفت (Niaghi et al., 2019). آب زهکشی کشاورزی، در رشد محصولات نقش ندارد (Zhang et al., 2020). این آب در صورت جمع‌آوری و جلوگیری از دفع به عنوان فاضلاب، می‌تواند به عنوان منبعی احتمالی برای آبیاری مجدد مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، هنگامی که آب از خاک و شبکه زهکشی عبور می‌کند، حاوی نمک‌ها، مواد شیمیایی کشاورزی و سایر آلاینده‌ها مانند آفت‌کش‌ها می‌شود؛ بنابراین نیاز به تصفیه دارد (Barnes, 2014).

۳-۱-۹- آب یخچال‌های طبیعی

آب کوه‌های یخی به عنوان یکی از منابع آب نامتعارف شناخته می‌شود که می‌توان آن را پس از ذوب به مناطق نیازمند آب انتقال داد یا مستقیماً کوه یخی را به مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود آب مواجه هستند، منتقل کرد (Marchenko & Eik, 2012; Yulmetov & Løset, 2017). آب کوه‌های یخی خالص‌ترین منبع آب نامتعارف در جهان محسوب می‌شود. این روش نیازمند فناوری انتقال و ذخیره‌سازی است و عمدتاً در مناطق قطبی کاربرد دارد (Marchenko & Eik, 2012).

۳-۱-۱۰- آب مجازی

مفهوم آب مجازی برای اولین بار توسط (Allan, 1998) مطرح شد و به مقدار آب شیرینی اطلاق می‌شود که در طول زنجیره تأمین برای تولید کالاها و خدمات مصرف می‌شود. این مفهوم شامل آبی است که در کالاهای وارداتی مانند گوشت، برنج و شکر مصرف شده است - محصولاتی که برای تولیدشان به حجم قابل توجهی آب نیاز است. بر اساس این تعریف، چندین سال طول کشید تا آب مجازی به ارزیابی‌های جهانی منابع آب راه یابد (Horlemann & Neubert, 2007; Wichelns, 2010). امروزه آب مجازی به عنوان یکی از منابع آب نامتعارف شناخته می‌شود که می‌تواند برای مناطق خشک مفید باشد، چرا که با واردات کالا از سایر مناطق، در واقع آب را نیز وارد می‌کند (Zhao et al., 2020). هم انتقال فیزیکی آب و هم آب مجازی می‌توانند به عنوان گزینه‌های ممکن برای تأمین آب کافی در مناطق خشک در نظر گرفته شوند (Winpenney et al., 2010).

۳-۱-۱۱- تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی

تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها روشی مؤثر برای افزایش ذخایر آب زیرزمینی از طریق نفوذ آب‌های سطحی است. این روش به ویژه در مناطق خشک و ساحلی برای جلوگیری از نفوذ آب شور کاربرد دارد (Bouwer, 2002; Prabhu and Venkateswaran, 2002).

(2015) پیدا کردن یک مکان بالقوه برای تغذیه مصنوعی نقش مهمی را در این روش ایفا می‌کند و به عوامل کلیدی مختلفی مانند بارندگی، تراکم زهکشی، شیب، نفوذپذیری خاک، کاربری/ پوشش اراضی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی وابسته است (Senanayake et al., 2016).

۳-۱-۱۲- آب فسیلی

آب فسیلی یا آب باستانی، منبع آب نامتعارف ارزشمند، محدود و غیرقابل تجدید محسوب می‌شود. این آب کهن در فضاهای دست‌نخورده مانند سفره‌های آب زیرزمینی و دریاچه‌های زیرخچالی یافت می‌شود. این آب شیرین باستانی میلیون‌ها سال پیش تشکیل شده و در مخازن عظیم زیرزمینی یا سفره‌های آبی محبوس شده است که تحت شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی گذشته به وجود آمده‌اند (Margat et al., 2006). سفره‌های آبی فسیلی اغلب از نظر زمین‌شناسی در حد بالا و پایین توسط سنگ‌های نفوذناپذیر محدود شده‌اند، به این معنی که پس از استخراج، این آب برای همیشه از بین می‌رود (Salameh, 2004).

جدول ۱- ویژگی‌های منابع آب نامتعارف (مزایا، محدودیت‌ها، نمونه کاربردها) اقتباس از Karimidastenaee et al., 2022 با تغییرات
Table 1- Characteristics of unconventional water resources (advantages, limitations, and global applications)
Adapted from Karimidastenaee et al., 2022, with modifications

منبع آب نامتعارف	نمونه کاربرد جهانی	مزایا	محدودیت‌ها
آب مه	آفریقای جنوبی، پرو، ایران	(۱) فناوری کم‌هزینه (۲) کیفیت بالا (۳) نیاز به تصفیه ندارد	(۱) دسترسی فصلی (۲) نیاز به نظارت
آب شبنم	شیلی، اسپانیا، هند	(۱) بدون نیاز به انرژی (۲) کیفیت بالا (۳) هزینه نگهداری کم	(۱) حجم کم (۲) وابسته به شرایط جوی
بارورسازی ابرها	چین، امارات، ایران، آمریکا	(۱) افزایش بارش (۲) بهبود اقتصاد کشاورزی (۳) کاهش خشکسالی	(۱) نیاز به شرایط جوی خاص (۲) هزینه بالا (۳) اثرات محیط زیستی (دید نقره)
جمع‌آوری آب باران	آلمان، هند، آفریقای جنوبی	(۱) ساده و کم‌هزینه (۲) تجدیدپذیر	(۱) وابسته به بارش (۲) آلودگی احتمالی
آب شیرین شده	خاورمیانه (عربستان)، مدیترانه	(۱) دسترسی به منابع نامحدود آب دریا (۲) کاهش وابستگی به منابع خارجی	(۱) هزینه بالا (۲) تولید شورابه (۳) مصرف انرژی زیاد
پساب تصفیه‌شده	جهانی (مناطق خشک)	(۱) مناسب برای کشاورزی و صنعت	(۱) نیاز به تصفیه پیشرفته (۲) هزینه عملیاتی بالا
آب خاکستری	آمریکا، اروپا، استرالیا	(۱) کاهش مصرف آب شرب (۲) مفید برای آبیاری فضای سبز	(۱) خطر آلودگی میکروبی (۲) افزایش شوری خاک
آب زهکشی کشاورزی	هند، مصر، سوریه	(۱) استفاده مجدد در کشاورزی	(۱) آلودگی آب‌های زیرزمینی/سطحی
آب یخچال‌های طبیعی	کانادا (نیوفاندلند)	(۱) خالص و بدون آلودگی (۲) ایجاد اشتغال	(۱) هزینه حمل و نقل بالا (۲) اثرات محیط زیستی

منبع آب نامتعارف	نمونه کاربرد جهانی	مزایا	محدودیت‌ها
آب مجازی	چین، آرژانتین، روسیه	(۱) صرفه‌جویی در منابع محلی (۲) کاهش تنش آبی	(۱) محاسبه پیچیده (۲) عدم استاندارد قیمت‌گذاری
تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی	خاورمیانه، اروپا (آلمان، فرانسه)	(۱) مقرون به صرفه (۲) کنترل سیل (۳) بهبود کیفیت آب (۴) نیاز به فناوری پیچیده ندارد (۵) تبخیر کم	(۱) نیاز به نگهداری (۲) کاهش جریان در مناطق خشک (۳) اختلال در خاک و پوشش گیاهی
آب فسیلی	لیبی، مصر، چاد	(۱) کیفیت بالا (۲) ذخایر زیاد	(۱) هزینه استخراج بالا (۲) غیرقابل تجدید

جدول (۱) نشان می‌دهد که انتخاب مناسب‌ترین منبع آب نامتعارف به عوامل متعددی از جمله پایداری، هزینه، ملاحظات محیط‌زیستی و شرایط جغرافیایی بستگی دارد. در این میان، منابعی مانند آب باران، آب خاکستری و آب شبنم به دلیل ماهیت تجدیدپذیر، هزینه‌های عملیاتی پایین و اثرات محدود محیط‌زیستی، به‌عنوان گزینه‌های پایدار و مقرون‌به‌صرفه مطرح می‌شوند. در مقابل، فناوری‌های پیشرفته‌تر نظیر آب‌شیرین‌کن‌ها و استخراج آب‌های فسیلی، با وجود قابلیت‌های منحصربه‌فرد خود، نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه و عملیاتی قابل توجهی هستند که ممکن است امکان به‌کارگیری گسترده آنها را محدود کند. از سوی دیگر، برخی روش‌ها مانند بارورسازی ابرها و استفاده از آب یخچال‌های طبیعی، علیرغم مزایای بالقوه، با چالش‌های محیط‌زیستی همراه هستند که ضرورت ارزیابی دقیق اثرات اکولوژیک را پررنگ می‌کند. همچنین، نتایج مؤید آن است که شرایط جغرافیایی و اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب روش مناسب ایفا می‌کنند؛ به‌طوری‌که راهکارهای مؤثر در مناطق ساحلی ممکن است در نواحی خشک داخلی کارایی نداشته باشند و بالعکس. این یافته‌ها بر اهمیت اتخاذ رویکردی جامع و منطقه‌ای در مدیریت منابع آب نامتعارف تأکید دارند.

۳-۲- مرور نظام‌مند منابع در حوزه آب‌های نامتعارف

تعداد مقالات منتشر شده در مورد منابع آب نامتعارف در طول زمان، به ویژه در ده سال گذشته، به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در حالی که اکثر انتشارات توسط محققان مستقر در ایالات متحده آمریکا یا چین نوشته شده‌اند، کشورهای دیگری مانند هند، ایران، استرالیا و اسپانیا نیز در این زمینه تحقیقات برجسته‌ای انجام داده‌اند. مرور نظام‌مند منابع در حوزه آب‌های نامتعارف نشان‌دهنده گستردگی و تنوع مطالعات انجام‌شده در این زمینه است. درحالی‌که مطالعات جهانی بیشتر بر توسعه فناوری‌های پیشرفته و چارچوب‌های نظری تمرکز دارند، پژوهش‌های ایرانی عمدتاً به حل مسائل محلی و کاربردی پرداخته‌اند. ترکیب این دو دیدگاه می‌تواند راهگشای توسعه پایدار منابع آب در آینده باشد.

جدول (۲) به‌صورت جامع به بررسی مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه پرداخته و جنبه‌های مختلفی شامل مزایا، محدودیت‌ها، نتایج کلیدی و دسته‌بندی موضوعی برای هر مطالعه را در بر می‌گیرد. این بررسی مقایسه‌ای امکان درک بهتر قابلیت‌ها و چالش‌های هر یک از روش‌های استحصال و استفاده از منابع آب نامتعارف را فراهم می‌سازد. این جدول مروری نظام‌مند بر مطالعات مرتبط با منابع آب نامتعارف از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۲۵ ارائه می‌دهد. بررسی سیستماتیک این مطالعات، سیر تکاملی پژوهش‌های این حوزه را نشان می‌دهد. در دهه‌های اولیه، مطالعات عمدتاً بر شناسایی منابع نامتعارف مانند آب خاکستری و بارش مصنوعی متمرکز بودند، در حالی که در سال‌های اخیر، توجه پژوهشگران به سمت توسعه فناوری‌های پیشرفته تصفیه، مدیریت یکپارچه منابع آب و ابعاد اجتماعی استفاده از این منابع معطوف شده است. این تحول نشان‌دهنده گذار از نگرش‌های

صرفاً فنی به رویکردهای جامع‌تر است که جنبه‌های پایداری و حکمرانی را نیز دربرمی‌گیرد. یافته‌های کلیدی این مطالعات حاکی از آن است که منابع آب نامتعارف می‌توانند سهم قابل توجهی در تأمین نیازهای آبی آینده داشته باشند. بر اساس پژوهش‌ها، این منابع قادرند تا ۲۵ درصد از نیاز آبی جهانی را تا سال ۲۰۵۰ تأمین کنند. در این میان، آب‌های بازیافتی و فناوری‌های شیرین‌سازی بیشترین سهم را در تأمین آب شهری و صنعتی به خود اختصاص داده‌اند. با این وجود، چالش‌های متعددی از جمله هزینه‌های بالای فناوری، مقاومت‌های فرهنگی در استفاده از پساب و خطرات محیط‌زیستی مانند شوری خاک، توسعه این منابع را با محدودیت مواجه ساخته است. در مقابل، راهکارهای نوینی مانند نانوفیلتراسیون و سیستم‌های غیرمتمرکز تصفیه آب، همچنین استفاده ترکیبی از منابع مختلف، امیدواری‌هایی برای غلبه بر این چالش‌ها ایجاد کرده‌اند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در این حوزه، پژوهش‌های موجود با محدودیت‌های مهمی روبرو هستند. کمبود داده‌های بلندمدت و عدم قطعیت در اطلاعات اقلیمی، قابلیت تعمیم بسیاری از مطالعات را محدود ساخته است. علاوه بر این، بعد اجتماعی استفاده از منابع آب نامتعارف که نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه‌ها دارد، در بسیاری از مطالعات نادیده گرفته شده است. چالش‌ها و فرصت‌های منابع آب نامتعارف در جهان و ایران با توجه به مرور منابع در جدول (۲) به شرح ذیل خلاصه می‌شود:

۳-۲-۱- چالش‌های اساسی

منابع آب نامتعارف با وجود پتانسیل بالای تأمین امنیت آبی، با موانع متعددی در سطح جهانی و ایران مواجه هستند.

۳-۲-۱-۱- محدودیت‌های فنی: وابستگی شدید به شرایط محیطی (مانند نیاز سیستم‌های جمع‌آوری مه به رطوبت بالا Kaseke & Wang, 2018) و کیفیت متغیر منابع (به‌ویژه پساب‌ها و آب‌های شور) چالش اصلی محسوب می‌شود. در ایران، مطالعاتی مانند Jamali et al. (2018) نشان داده‌اند که حساسیت گونه‌های گیاهی به شوری (مانند کاهش ۵۰ درصدی عملکرد فلفل دلمه‌ای) استفاده از این منابع را محدود می‌کند.

۳-۲-۱-۲- موانع اقتصادی: هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه و نگهداری، به ویژه در فناوری‌های پیشرفته مانند نمک‌زدایی (Gude, 2017)، یکی از اصلی‌ترین موانع گسترش این سیستم‌هاست. اگرچه برخی فناوری‌ها مانند سیستم‌های ترکیبی آب خاکستری (Dixon et al., 1999) بازگشت سرمایه ۳-۵ ساله دارند، اما برای بسیاری از کشورهای در حال توسعه، حتی این میزان سرمایه‌گذاری اولیه نیز سنگین است.

۳-۲-۱-۳- مقاومت اجتماعی: به‌ویژه در پذیرش عمومی آب بازیافتی (Dolnicar & Schäfer, 2009) و نگرانی‌های بهداشتی مشهود است. در ایران، اگرچه پروژه‌هایی مانند استفاده از پساب در مشهد (Taheri et al., 2023) موفقیت‌آمیز بوده‌اند، اما مقاومت محلی به دلیل باورهای فرهنگی همچنان وجود دارد.

۳-۲-۱-۴- محدودیت‌های مدیریتی: مانند نبود چارچوب‌های حکمرانی یکپارچه و عدم تطبیق فناوری‌ها با شرایط محلی (به‌ویژه در مناطق خشک ایران) از دیگر موانع هستند.

۳-۲-۲- فرصت‌های راهبردی

با این حال، فرصت‌های قابل توجهی برای غلبه بر این چالش‌ها وجود دارد.

۳-۲-۲-۱- پیشرفت‌های فناورانه: پیشرفت‌های اخیر مانند توسعه سوپرجاذب‌های سازگار با شوری (Teymouri & Sharifan, 2013) و سیستم‌های هیبریدی نمک‌زدایی با انرژی تجدیدپذیر (Beigi & Hosseinzadeh, 2021) می‌توانند هزینه‌ها را تا ۵۰٪ کاهش دهند. در ایران، موفقیت پروژه‌هایی مانند پرورش ماهی قزل‌آلا با آب لب‌شور در کرمان (Nakhaei & Takasi, 2013) و

استحصال رطوبت هوا در قزوین (Koochi et al., 2023) نشان‌دهنده پتانسیل بالای منابع محلی است. پیشرفت در فناوری‌های غشایی، به ویژه نانوفیلتراسیون و نانولوله‌های کربنی (Werber et al., 2016)، امکان تصفیه کارآمدتر آب‌های نامتعارف را با هزینه کمتر فراهم آورده است. این فناوری‌ها نه تنها راندمان استفاده از منابع آب را بهبود بخشیده‌اند، بلکه گامی مهم در جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار محسوب می‌شوند.

۲-۲-۳- مدل‌های مدیریتی پیشرفته: تدوین استانداردهای انعطاف‌پذیر کیفیت آب بر اساس نوع مصرف (Echchel et al., 2024) و ادغام این منابع در مدیریت یکپارچه (Wiek & Larson, 2012) می‌تواند راهگشا باشد. تجربیات موفق جهانی مانند استفاده از آب بازیافتی در کشاورزی (استرالیا) و شیرین‌سازی مقرون‌به‌صرفه (عربستان) نیز الهام‌بخش است. در ایران، تمرکز بر راهکارهای کم‌هزینه مانند تصفیه غیرمتمرکز (Shamabadi et al., 2015) و انتخاب گونه‌های مقاوم مانند کینوا (Jamali & Sharifan, 2020) می‌تواند بهره‌وری را افزایش دهد. توسعه چارچوب‌های تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی (Wu et al., 2020) و مدل‌های یکپارچه (Wang et al., 2024) امکان تحلیل چندمعیاره منابع آب نامتعارف را فراهم کرده است. این مدل‌ها با در نظر گرفتن ابعاد فنی، اقتصادی و اجتماعی، به برنامه‌ریزان کمک می‌کنند تا تخصیص بهینه‌ای از منابع آب داشته باشند. همچنین، همکاری‌های بین‌المللی برای انتقال فناوری و جذب سرمایه‌گذاری (Qadir et al., 2022) از جمله فرصت‌های کلیدی برای ایران محسوب می‌شود.

۳-۲-۲- کاربردهای عملی در بخش کشاورزی و شرب: مطالعات میدانی نشان داده‌اند که استفاده از آب‌های شور و پساب تصفیه‌شده می‌تواند تا ۲۰٪ عملکرد محصولات کشاورزی را افزایش دهد (Qadir et al., 2007). این یافته به ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود منابع آب شیرین مواجه هستند، حائز اهمیت است. در مصارف شرب نیز استقرار سیستم‌های تصفیه غیرمتمرکز در مناطقی مانند قم (Shamabadi et al., 2015) نشان داده که می‌توان تا ۴۰٪ در مصرف آب شرب صرفه‌جویی کرد. این سیستم‌ها با بازگشت سرمایه حدود ۲/۵ سال، از توجیه اقتصادی مناسبی نیز برخوردارند.

به‌طور خلاصه، درحالی‌که چالش‌هایی مانند هزینه‌های بالا، وابستگی فنی و مقاومت اجتماعی استفاده از منابع آب نامتعارف را محدود می‌کنند، ترکیب فناوری‌های نوین (هوش مصنوعی، نانوفیلتراسیون)، سیاست‌گذاری هوشمند (استانداردهای تطبیقی) و مشارکت محلی می‌تواند این منابع را به راهکاری پایدار برای مدیریت بحران آب تبدیل کند.

۳-۲-۳- راهکارهای پیشنهادی

۳-۲-۳-۱- توسعه فناوری‌های یکپارچه:

تلفیق انرژی‌های تجدیدپذیر با سیستم‌های نمک‌زدایی (Beigi & Hosseinzadeh, 2021) می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰٪ کاهش دهد.

توسعه فیلترهای کم‌هزینه مبتنی بر سیلیس (Ajaloyan et al., 2019) برای تصفیه غیرمتمرکز پساب‌ها، راهکاری عملی برای مناطق محروم است.

۳-۲-۳-۲- اصلاح نظام حکمرانی:

تدوین چارچوب‌های سیاستی انعطاف‌پذیر (Karimidastenaee et al., 2022) که بتواند با شرایط مختلف منطقه‌ای سازگار شود. استانداردسازی کیفیت آب بر اساس نوع مصرف (Echchel et al., 2024) به جای استانداردهای یکسان برای همه مصارف.

جدول ۲- مرور سیستماتیک مطالعات کلیدی منابع آب نامتعارف: رویکردها، یافته‌ها و کاربردها

Table 2. Systematic review of key studies on unconventional water resources: approaches, findings, and applications

منبع آب نامتعارف	منطقه مطالعه	نتایج کلیدی	مزایا	محدودیت‌ها	دسته‌بندی موضوعی	نویسندگان
منابع متعارف و نامتعارف	جهانی	شناسایی مناطق بحرانی آبی	ارائه شاخص‌های جدید	تمرکز بر کشورهای توسعه‌یافته	مدیریت کلان منابع آب	Gleick (1998)
آب خاکستری + باران	مساکن شهری بریتانیا	صرفه‌جویی سالانه ۶۵-۴۵ مترمکعب	کاهش مصرف آب، بازگشت سرمایه ۳-۵ سال	نیاز به فضای نصب، چالش کیفیت آب	سیستم‌های ترکیبی	Dixon et al. (1999)
بارش مصنوعی	ماهاراشترا، هند	موفقیت ۶۸٪ عملیات	کاهش خشکسالی، بهبود کشاورزی	وابستگی به شرایط جوی، هزینه بالا	فناوری‌های تعدیل آب و هوا	Murty et al. (2000)
آب ذوب یخ‌ها	شبه‌جزیره جنوبگان	افزایش دما، کاهش یخ‌ها	پایه مطالعات اقلیمی	کمبود داده، پیچیدگی مدل‌سازی	تغییرات اقلیمی	Smith & Stammerjohn (2001)
آب زیرزمینی	بریتانیا	شناسایی چالش‌های پیاده‌سازی	امکان افزایش ذخیره آب شیرین	نیاز به مطالعات محلی دقیق	ذخیره‌سازی آب زیرزمینی	Gale et al. (2002)
تمام منابع نامتعارف	جهانی	منابع نامتعارف ۲۵٪ نیاز ۲۰۵۰ را فراهم می‌کنند	چارچوب مفهومی نظام‌مند	عدم در نظر گرفتن مسائل اجتماعی	ارزیابی منابع جهانی	Oki et al. (2003)
مه‌بارش	جنگل ابری گواتمالا	تفاوت جذب بین گونه‌ها	داده‌های دقیق میدانی	اندازه‌گیری پیچیده	آب‌های جوی	Holder (2004)
آب خاکستری تصفیه‌شده	عمان	راهکارهای عملی	کاهش فشار بر منابع	چالش‌های کیفیت آب و بهداشت	آب خاکستری	Prathapar et al. (2005)
آب زیرزمینی غیر تجدیدپذیر	مناطق خشک جهانی	طبقه‌بندی سفره‌ها	رویکرد یکپارچه	ارزیابی ذخایر پیچیده	آب زیرزمینی	Foster & Loucks (2006)
آب‌های شور و پساب	کشورهای خشک	افزایش ۲۰٪ تولیدات	تحلیل منطقه‌ای	کیفیت متغیر آب	کشاورزی با منابع نامتعارف	Qadir et al. (2007)
آب‌های شور و پساب	جهانی	نانوفیلتراسیون مؤثرترین	پوشش گسترده فناوری‌ها	هزینه بالای فناوری‌ها	فناوری‌های تصفیه	Shannon et al. (2008)
آب بازیافتی	استرالیا	پذیرش بیشتر آب بازیافتی	مطالعه میدانی گسترده	تفاوت‌های فرهنگی	پذیرش اجتماعی	Dolnicar & Schäfer (2009)

Li et al. (2010)	سیستم‌های خانگی	محدودیت ظرفیت ذخیره	کاهش ۴۰٪ مصرف آب	طراحی مناسب برای خانه‌ها	ایرلند	آب باران + خاکستری
Elimelech & Phillip (2011)	شیرین‌سازی	چالش‌های فنی در مقیاس بزرگ	تحلیل جامع	کاهش ۵۰٪ انرژی تا ۲۰۳۰	جهانی	آب دریا
Wiek & Larson (2012)	حکمرانی آب	پیچیدگی اجرا	رویکرد یکپارچه	نیاز به مشارکت ذینفعان	جهانی	تمام منابع
Grant et al. (2012)	استفاده از پساب	چالش‌های بهداشتی	رویکرد اکوسیستمی	پساب منبعی با ارزش	جهانی	پساب شهری
Nakhaei & Takasi (2013)	آبزی‌پروری	محدودیت در گونه‌ها	استفاده از منابع بلااستفاده	امکان پرورش قزل‌آلا	کرمان	آب‌های لب‌شور
Farhadi Maboud et al. (2013)	کشاورزی با آب شور	کاهش عملکرد در شوری بالا	کاهش مصرف آب شیرین	اختلاط ۱۰٪ آب دریا	گلخانه گرگان	آب دریا
Teymouri & Sharifan (2013)	فناوری‌های جذب آب	هزینه اولیه بالا	جذب آب بالا	عملکرد بهتر KCl	-	آب شور
Khalil et al. (2014)	مدیریت آبخیزداری	وابستگی به بارش	بهبود رطوبت خاک	کاهش نیاز آبیاری	شمال غرب پاکستان	آب باران
Vuollekoski et al. (2014)	آب‌های جوی	عدم قطعیت پارامترها	شناسایی مناطق مستعد	مناطق ساحلی مستعد	مناطق خشک جهانی	شبنم
Shamabadi et al. (2015)	تصفیه غیرمتمرکز	محدودیت ظرفیت	صرفه‌جویی انرژی	بازگشت سرمایه ۲/۵ سال	قم	آب خاکستری
Lo & Koralegedara (2015)	تغییر اقلیم	عدم قطعیت پیش‌بینی	افزایش تاب‌آوری	نیاز به افزایش ۳۰٪ ظرفیت	کلمبو، سری‌لانکا	آب باران شهری
Fakhri et al. (2016)	آب خاکستری	خطر آلودگی میکروبی	صرفه‌جویی اقتصادی	کاهش ۶۶٪ مصرف	-	آب خاکستری
Shirzad (2016)	استفاده از پساب	خطر شوری خاک	ارزش کودی بالا	تأمین ۴/۸ میلیون مترمکعب	بیرجند	پساب شهری
Werber et al. (2016)	فناوری‌های تصفیه	چالش تولید انبوه	بررسی جامع	نانولوله‌های کربنی آینده‌دار	جهانی	آب‌های شور
Gude (2017)	شیرین‌سازی	مصرف انرژی بالا	کاهش هزینه‌ها	هزینه به ۰/۵ دلار/m ³	جهانی	آب دریا و لب‌شور
Sprenger et al. (2017)	تغذیه مصنوعی	ناهمگونی داده‌ها	امکان مطالعات تطبیقی	رشد ۴۰٪ پروژه‌ها	اروپا	آب سطحی، پساب، باران
Kaseke & Wang (2018)	آب‌های جوی	وابستگی به شرایط جوی	منبع تجدیدپذیر	نیاز به تصفیه ساده	مناطق خشک	مه و شبنم

Jamali et al. (2018)	کشاورزی با آب شور	حساسیت بالای گیاه	ارزیابی دقیق	کاهش ۵۰٪ عملکرد	گلخانه گرگان	آب دریا
Elkiran et al. (2019)	استفاده از پساب	نیاز به تصفیه پیشرفته	کاهش فشار بر منابع	استفاده محدود برای آبیاری	قبرس شمالی	پساب شهری
Ajaloyan et al. (2019)	آبیاری با پساب	نیاز به تعمیر و نگهداری	افزایش کارایی آبیاری	کاهش شوری خاک	اصفهان	آبیاری زیرسطحی با پساب
Jamali & Sharifan (2020)	کشاورزی با پساب	اثر منفی شوری بر رشد	بهبود عملکرد	افزایش رشد کینوا	مشهد	پساب
Wu et al. (2020)	ارزیابی منابع	پیچیدگی سطوح دانه‌بندی	انعطاف‌پذیری بالا	شناسایی منابع بهینه	مناطق با تنش آبی	آب‌های بازیافتی، شور، اتمسفری، صنعتی
Beigi & Hosseinzadeh (2021)	شیرین‌سازی	مصرف انرژی بالا	کاهش هزینه‌ها	سازگاری با انرژی تجدیدپذیر	-	شیرین‌سازی آب‌های شور
Raveesh et al. (2021)	آب‌های جوی	وابستگی به شرایط جوی	پوشش تمام روش‌ها	راندمان به ۹۰٪ رسیده	مناطق خشک	رطوبت هوا
Ghorbani Minaee et al. (2021)	کشاورزی با پساب	نیاز به زیرساخت‌های ویژه	افزایش راندمان	بهبود کارایی مصرف آب	گرگان	پساب
Nasr et al. (2022)	تصفیه غیرمتمرکز	نیاز به نظارت مستمر	کاهش مصرف آب شیرین	صرفه اقتصادی	مناطق روستایی	فاضلاب تصفیه‌شده
Qadir et al. (2022)	مدیریت جهانی	تفاوت دسترسی فناوری	کاهش فشار بر منابع	نیاز به سرمایه‌گذاری	مناطق خشک	نمک‌زدایی، آب‌های بازیافتی، اتمسفری، زیرزمینی شور، صنعتی
Karimidastenaee (2022)	سیاست‌گذاری جهانی	تفاوت‌های منطقه‌ای	امنیت آبی جهانی	نیاز به همکاری بین‌المللی	مناطق خشک جهانی	آب‌های بازیافتی، نمک‌زدایی‌شده، اتمسفری، صنعتی
Ramezani et al. (2023)	آب‌های جوی	دقت کمتر در مناطق خشک	مدل‌های اقلیمی قابل قبول	بهترین قابلیت در منجیل و بندرانزلی	شمال و شمال غرب ایران	رطوبت هوا
Taheri et al. (2023)	استفاده از پساب	نیاز به نظارت مستمر	کاهش مصرف آب شیرین	در محدوده استاندارد	مشهد	پساب تصفیه‌شده
Koohi et al. (2023)	آب‌های جوی	وابستگی به شرایط جوی	روش سیمی-توری کارآمد	قابلیت بالا در بهار و تابستان	استان قزوین	رطوبت هوا
Wanget al. (2024)	مدیریت یکپارچه	کمبود داده‌ها	بهبود پایداری	کاهش فقر آبی	مناطق خشک چین	آب‌های بازیافتی، نمک‌زدایی‌شده، خاکستری، باران

Echchelh et al. (2024)	آب صنعتی	نگرانی کیفیت آب	کاهش فشار بر منابع	استفاده ایمن برای برخی محصولات	حوضه آندارکو (آمریکا)	آب تصفیه شده نفت/گاز
Ruifang et al (2024)	مدیریت منطقه‌ای	کمبود داده‌های بلندمدت	توسعه پایدار منطقه‌ای	نیاز به سیاست‌گذاری یکپارچه	پکن تیانجین هبئی چین	فاضلاب تصفیه شده، آب‌های شور، صنعتی، باران
Wang et al. (2025)	مدیریت شهری	عدم بررسی هزینه‌ها	سناریوهای عرضه-تقاضا	افزایش شکاف آبی	شهرهای انرژی خیز نیمه خشک	آب‌های بازیافتی، نمک‌زدایی شده
Angelakis et al. (2025)	مدیریت تاریخی	عدم تحلیل هزینه‌های تاریخی	حل بحران آب	استفاده تاریخی از قنات‌ها	یونان	آب باران، آب‌های شور، فاضلاب بازیافتی

۳-۲-۳- برنامه‌های اجتماعی- فرهنگی:

اجرای برنامه‌های آموزشی هدفمند (Fakhri et al., 2016) برای افزایش آگاهی عمومی از مزایا و ایمنی آب‌های بازیافتی. مشارکت فعال ذینفعان محلی (Nasr et al., 2022) در طراحی و اجرای پروژه‌های آب نامتعارف.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با بررسی نظام‌مند چالش‌ها و فرصت‌های منابع آب نامتعارف در سطح جهانی و ایران نشان می‌دهد که این منابع پتانسیل قابل توجهی برای کمک به حل بحران فزاینده آب دارند. یافته‌ها حاکی از آن است که در شرایط کنونی که تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضا، فشار بی‌سابقه‌ای بر منابع آب متعارف وارد کرده است، آب‌های نامتعارف می‌توانند به عنوان مکملی حیاتی در تأمین امنیت آبی عمل کنند. تحلیل مطالعات نشان داد که علیرغم چالش‌های متعدد از جمله هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، وابستگی به شرایط محیطی، محدودیت‌های فناورانه و موانع اجتماعی-فرهنگی، پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های تصفیه، سیستم‌های هوشمند مدیریت آب و رویکردهای مشارکتی، امکان بهره‌برداری مؤثر از این منابع را فراهم کرده‌اند. در ایران نیز تجربیات موفق در زمینه‌هایی مانند استفاده از پساب تصفیه شده، استحصال رطوبت هوا و پرورش آبزیان با آب‌های شور، گواه پتانسیل بالای این منابع در شرایط اقلیمی خاص کشور است. کلید موفقیت در بهره‌برداری پایدار از منابع آب نامتعارف، اتخاذ رویکردی یکپارچه و چندبعدی است که شامل موارد ذیل است:

۱. توسعه فناوری‌های بومی و کم‌هزینه متناسب با شرایط محلی
۲. تدوین چارچوب‌های سیاستی انعطاف‌پذیر و استانداردهای کیفیت آب
۳. اجرای برنامه‌های آموزشی و فرهنگ‌سازی برای افزایش پذیرش اجتماعی
۴. ایجاد نظام‌های پایش و ارزیابی مستمر اثرات محیط‌زیستی
۵. توسعه همکاری‌های بین‌المللی برای انتقال دانش و فناوری

در نهایت، این مطالعه بر این نکته تأکید دارد که منابع آب نامتعارف نه به عنوان جایگزین، بلکه به عنوان مکملی برای منابع متعارف باید در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب مورد توجه قرار گیرند. موفقیت در مدیریت منابع آب نامتعارف مستلزم تحول اساسی در حکمرانی آب است. گذار از رویکردهای متمرکز فعلی به سمت مدل‌های مشارکتی که در آن بخش خصوصی و جوامع محلی نقش فعالی ایفا می‌کنند. این تحول باید همراه با توسعه زیرساخت‌های نظارتی قوی و استقرار سیستم‌های پایش

بلندمدت باشد تا از تبدیل راهکارهای کوتاه‌مدت به بحران‌های آتی جلوگیری شود. این رویکرد یکپارچه، تضمین‌کننده پایداری منابع آب در مواجهه با چالش‌های فزاینده تغییرات اقلیمی و رشد جمعیت خواهد بود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

فریدا ایرجی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها. پیام نجفی: نظارت، ویرایش، روش‌شناسی و اعتبارسنجی.

منابع

- Adewumi, J. R., Ilemobade, A. A., & van Zyl, J. E. (2010). Treated wastewater reuse in South Africa: Overview, potential, and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(2), 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.09.012>
- Ajaloyan, S., Najafi, P., Nazem, Z., & Tabatabaei, S. H. (2019). Effect of applying silicate filter with subsurface drip irrigation using treated wastewater on soil chemical parameters. *Iranian Water Research Journal*, 13 (1), 59-68.
- Allan, J. A. (1998). Virtual water: A strategic resource. *Ground Water*, 36(4), 545-546.
- Almanaseer, N., Hindiyeh, M., & Al-Assaf, R. (2020). Hydrological and environmental impact of wastewater treatment and reuse on Zarqa River Basin in Jordan. *Environments*, 7(2), 14. <https://doi.org/10.3390/environments7020014>
- Angelakis, A. N., Zafeirakou, A., Kourgialas, N. N., & Voudouris, K. (2025). The evolution of unconventional water resources in the Hellenic world. *Sustainability*, 17(6), 2388. <https://doi.org/10.3390/su17062388>
- Baawain, M. S., Al-Mamun, A., Omidvarborna, H., Al-Sabti, A., & Choudri, B. S. (2020). Public perceptions of reusing treated wastewater for urban and industrial applications: challenges and opportunities. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 1859-1871. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0266-0>
- Barnes, J. (2014). Mixing waters: The reuse of agricultural drainage water in Egypt. *Geoforum*, 57, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.11.019>
- Beigi, N., & Hosseinzadeh, M. (2021). Introduction and economic evaluation of various methods proposed for unconventional water desalination considering current and future challenges for sustainable water supply [Conference presentation]. *International Conference on Sustainable Development and Urban Development*, Iran. <https://sid.ir/paper/901791/en>
- Beysens, D. (2006). Dew nucleation and growth. *Comptes Rendus Physique*, 7(9-10), 1082-1100. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.10.020>
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., ... & Revelli, R. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, 711, 134731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134731>
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 121-142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
- Buchholz, M. (2008). A scenario for the future development of the agricultural and water sector in arid and hyper arid areas. Overcoming Drought, The Cyclor Support Implementation Guide.
- Dixon, A., Butler, D., & Fewkes, A. (1999). Water saving potential of domestic water reuse systems using greywater and rainwater in combination. *Water Science and Technology*, 39(5), 25-32. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00083-9)

- Dolnicar, S., & Schäfer, A. I. (2009). Desalinated versus recycled water: Public perceptions and profiles of the accepters. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 888-900. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.02.003>
- Echchelh, A., Hutchison, J. M., Randtke, S. J., & Peltier, E. (2024). Treated water from oil and gas extraction as an unconventional water resource for agriculture in the Anadarko Basin. *Science of The Total Environment*, 912, 168820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168820>
- Elimelech, M., & Phillip, W. A. (2011). The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712-717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- Elkiran, G., Aslanova, F., & Hiziroglu, S. (2019). Effluent water reuse possibilities in Northern Cyprus. *Water*, 11(2), 191. <https://doi.org/10.3390/w11020191>
- Fakhri, S. A., Nasri, M., & Nasri, A. (2016). Application of gray water to reduce drinking water consumption in residential homes [Conference presentation]. *Iranian Congress of Water and Wastewater Science and Engineering*, Iran. <https://sid.ir/paper/875982/en>
- Farhadi Maboud, F., Shahnazari, A., Ziatbar Ahmadi, M. K., & Aghajani, G. (2013). Investigating the effect of different concentrations of Caspian Sea water on yield and yield components of oil sunflower [Conference presentation]. *National Conference on Drainage and Sustainable Agriculture*, Iran.
- Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T., & Hurni, H. (2014). Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 52-62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>
- Foster, S., & Loucks, D. P. (2006). Non-renewable groundwater resources: A guidebook on socially sustainable management for water-policy makers (IHP-VI Series on Groundwater No. 10). UNESCO.
- Gale, I. N., Williams, A. T., Gaus, I., & Jones, H. K. (2002). ASR-UK: elucidating the hydrogeological issues associated with Aquifer Storage and Recovery in the UK.
- Ghafoor, A., Ahmed, T., Munir, A., Arslan, C., & Ahmad, S. A. (2020). Techno-economic feasibility of solar based desalination through reverse osmosis. *Desalination*, 485, 114464. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114464>
- Ghorbani Minaee, L., Zakerinia, M., Rezaei Asl, A., & Mirkarimi, H. R. (2021). Investigating the effect of irrigation management with magnetized urban wastewater on rice growth indices. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 12(1), 226-240. <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.138337>
- Gleick, P. H. (1998). Water in crisis: Paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 8(3), 571-579. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0571:WICPTS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0571:WICPTS]2.0.CO;2)
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134(3), 371-385. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>
- Grant, S. B., Saphores, J. D., Feldman, D. L., Hamilton, A. J., Fletcher, T. D., Cook, P. L., ... & Marusic, I. (2012). Taking the "waste" out of "wastewater" for human water security and ecosystem sustainability. *Science*, 337(6095), 681-686. <https://doi.org/10.1126/science.1216852>
- Gude, V. G. (2017). Desalination and water reuse to address global water scarcity. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(4), 591-609. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9449-7>
- Haddad, M., & Mizyed, N. (2004). Non-conventional options for water supply augmentation in the Middle East: A case study. *Water International*, 29(2), 232-242. <https://doi.org/10.1080/02508060408691773>
- Holder, C. D. (2004). Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management*, 190(2-3), 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.11.004>
- Horlemann, L., & Neubert, S. (2007). Virtual water trade: A realistic concept for resolving the water crisis?. 25. *DEU*, p. 139.
- Indelicato, S., Tamburino, V., & Zimbone, S. M. (1993). Unconventional water resource use and management. *Ressources en eau: developpement et gestion dans les pays mediterraneens*.
- Jaber, J. O., & Mohsen, M. S. (2001). Evaluation of non-conventional water resources supply in Jordan. *Desalination*, 136(1-3), 83-92. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00168-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00168-0)
- Jamali, S., Sharifan, H., & Sajadi, F. (2018). Utilization of unconventional water resources for irrigation of bell pepper (*Capsicum annuum*) under greenhouse conditions. *Water and Soil Conservation Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 25 (1), 243-256. <https://sid.ir/paper/156378/en>

- Jamali, S., & Sharifan, H. (2020). Investigating the effect of Zaytoonik on yield and yield components of quinoa (*Chenopodium quinoa*) under irrigation with unconventional water resources. *Water and Soil Conservation Research*, 27 (3), 229-244. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.14856.2999>
- Jensen, J. B., & Lee, S. (2008). Giant sea-salt aerosols and warm rain formation in marine stratocumulus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(12), 3678-3694. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2617.1>
- Ji, L., Wu, T., Xie, Y., Huang, G., & Sun, L. (2020). A novel two-stage fuzzy stochastic model for water supply management from a water-energy nexus perspective. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123386>
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, 657, 1343-1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Karimidastenaie, Z., Avellán, T., Sadegh, M., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2022). Unconventional water resources: Global opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 827, 154429. <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154429>
- Kaseke, K. F., & Wang, L. (2018). Fog and dew as potable water resources: Maximizing harvesting potential and water quality concerns. *GeoHealth*, 2(10), 327-332. <https://doi.org/10.1029/2018GH000171>
- Khalil, S. K., Rehman, S., Rehman, A., Wahab, S., Muhammad, F., Khan, A. Z., & Khan, A. (2014). Water harvesting through micro-watershed for improved production of wheat (*Triticum aestivum* L.) in semiarid region of Northwest, Pakistan. *Soil and Tillage Research*, 138, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.007>
- Koohi, S., Bahmanabadi, B., Partovi, Z., Safari, F., Khajevand Sas, M., Ramezani Etetali, H., et al. (2023). Evaluation of ERA5 reanalysis dataset for simulation of climatic variables and water harvesting from humidity (Case study: Qazvin Province). *Journal of Water and Soil Science*, 27 (4), 153–167. <https://doi.org/10.47176/jwss.27.4.50623>
- Li, Z., Boyle, F., Reynolds, A., 2010. Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination* 260 (1-3), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.035>
- Lo, K. F. A., & Koralegedara, S. B. (2015). Effects of climate change on urban rainwater harvesting in Colombo city, Sri Lanka. *Environments*, 2(1), 105-124. <https://doi.org/10.3390/environments2010105>
- Marchenko, A., & Eik, K. (2012). Iceberg towing in open water: Mathematical modeling and analysis of model tests. *Cold Regions Science and Technology*, 73, 12-31. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2011.11.008>
- Margat, J., Foster, S., & Droubi, A. (2006). Concept and importance of non-renewable resources. In *Non-renewable groundwater resources* (pp. 13-24). UNESCO.
- Murad, A. A. (2010). An overview of conventional and non-conventional water resources in arid region: assessment and constrains of the United Arab Emirates (UAE). *Journal of Water Resource and Protection*, 2(2), 181-190. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.22020>
- Murty, A. S. R., Selvam, A. M., Devara, P. C. S., Krishna, K., Chatterjee, R. N., Mukherjee, B. K., & Jadhav, D. B. (2000). 11-year warm cloud seeding experiment in Maharashtra State, India. *Journal of Weather Modification*, 32(1), 10-20.
- Nakhaei, N., & Takasi, M. V. (2013). Utilization of unconventional water resources (brackish water) for cold-water fish production [Conference presentation]. *National Conference on Development and Breeding of Cold-Water Fishes*, Iran. <https://sid.ir/paper/871486/en>
- Nasr, F., & El-Shafai, S. A. (2022). Decentralized domestic wastewater management as unconventional water resource for agricultural purposes. *Egyptian Journal of Chemistry*, 65(5), 119-129. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2021.91991.4395>
- Negm, A. M., Bouderbala, A., Chenchouni, H., & Barcelo, D. (2018). Update, Conclusions, and Recommendations for the “Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt”. In: Negm, A. (eds) *Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 75. Springer, Cham. pp. 509–532. https://doi.org/10.1007/978_2018_336
- Ngigi, S. N. (2003). What is the limit of up-scaling rainwater harvesting in a river basin?. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20-27), 943-956. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.015>

- Niaghi, A. R., Jia, X., Steele, D. D., & Scherer, T. F. (2019). Drainage water management effects on energy flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. *Agricultural Water Management*, 225, 105760. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760>
- Odendaal, P.E., 2009. Unconventional sources of water supply. *Water Health* II, 88.
- Oki, T., Agata, Y., Kanae, S., Saruhashi, T., & Musiake, K. (2003). Global water resources assessment under climatic change in 2050 using TRIP. *International Association of Hydrological Sciences, Publication*, 280, 124-133.
- Patel, P., Muteen, A., & Mondal, P. (2020). Treatment of greywater using waste biomass derived activated carbons and integrated sand column. *Science of the Total Environment*, 711, 134586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134586>
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2009). Coping with water scarcity: Addressing the challenges. Springer Science & Business Media.
- Prabhu, M. V., & Venkateswaran, S. (2015). Delineation of artificial recharge zones using geospatial techniques in Sarabanga Sub Basin Cauvery River, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, 4, 1265-1274. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.165>
- Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S., & Al Harassi, A. (2005). Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*, 186(1-3), 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.018>
- Qadir, M., Sharma, B. R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., & Karajeh, F. (2007). Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural Water Management*, 87(1), 2-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.018>
- Qadir, M., Smakhtin, V., Koo-Oshima, S., & Guenther, E. (2022). Global water scarcity and unconventional water resources. In M. Qadir, V. Smakhtin, S. Koo-Oshima, & E. Guenther (Eds.), *Unconventional Water Resources* (pp. 3-17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90146-2_1
- Rahaman, M. F., Jahan, C. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Rainwater harvesting: practiced potential for integrated water resource management in drought-prone Barind tract, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100267>
- Ramezani Etedali, H., Koohi, S., & Partovi, Z. (2023). Evaluation of multi-model climate development methods based on CMIP5 for assessing atmospheric water harvesting potential. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (11), 1609-1625. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364087.669553>
- Raveesh, G., Goyal, R., & Tyagi, S. K. (2021). Advances in atmospheric water generation technologies. *Energy Conversion and Management*, 239, 114226. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114226>
- Salameh, E. (2004). Exploitation of Fossil Aquifers and Future Water Supplies in the Middle East. In: Zereini, F., Jaeschke, W. (eds) *Water in the Middle East and in North Africa*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10866-6_2
- Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1991). Fog-water collection in arid coastal locations. *Ambio*, 20(7), 303-308. <http://www.jstor.org/stable/4313850>
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.03.002>
- Shamabadi, N., Bakhtiari, H., Kochakian, N., & Farahani, M. (2015). The investigation and designing of an onsite grey water treatment systems at Hazrat-e-Masoumeh University, Qom, IRAN. *Energy Procedia*, 74, 1337-1346. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.780>
- Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301-310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>
- Shirzad, S. (2016). Evaluation of irrigation water supply potential and fertilizer value of urban wastewater treatment plant effluent: Case study of Birjand city treatment plant [Conference presentation]. *9th Congress of Pioneers of Progress*, Iran.
- Smith, R. C., & Stammerjohn, S. E. (2001). Variations of surface air temperature and sea-ice extent in the western Antarctic Peninsula region. *Annals of Glaciology*, 33, 493-500. <https://doi.org/10.3189/172756401781818662>

- Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F., & Hannappel, S. (2017). Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: Historical development, current situation and perspectives. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1909-1922. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8>
- Taheri, S. M., Banejhad, H., & Karimi Miyandoab, H. (2023). Investigating the possibility of using treated wastewater for irrigation considering its environmental effects (Case study: Chaharbakht local treatment plant effluent). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 17 (6), 1035-1052.
- Talabi, A., & Pourmohammadi, S. (2016). *Principles of cloud seeding (Feasibility, implementation, and evaluation)*. Yazd University Press. (In Persian)
- Teymouri, F., & Sharifan, H. (2013). Investigating the effect of monovalent salts on water absorption by superabsorbent hydrogels [Conference presentation]. *National Conference on Drainage and Sustainable Agriculture*, Iran. <https://sid.ir/paper/872682/en>
- Toosi, A. S., Tousi, E. G., Ghassemi, S. A., Cheshomi, A., & Alaghmand, S. (2020). A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting. *Journal of Hydrology*, 582, 124501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124501>
- UN-Water. (2021). Summary Progress Update 2021: SDG 6 — water and sanitation for all. United Nations.
- Vuollekoski, H., Vogt, M., Sinclair, V. A., Duplissy, J., Järvinen, H., Kyrö, E. M., ... & Kulmala, M. (2014). Estimates of global dew collection potential. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 11(8), 9519-9549. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-9519-2014>
- Wang, R., Wu, F., Ji, Y., & Feng, C. (2024). Nonlinear impact of unconventional water use on water resource sustainability in China: A perspective on water poverty. *Ecological Indicators*, 162, 112065. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112065>
- Wang, D., Li, K., Li, H., Zhang, Y., Fu, T., Sun, L., Wang, Y., & Zhang, J. (2025). Water resource utilization and future supply-demand scenarios in energy cities of semi-arid regions. *Scientific Reports*, 15(1), 5005. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85458-5>
- Werber, J. R., Osuji, C. O., & Elimelech, M. (2016). Materials for next-generation desalination and water purification membranes. *Nature Reviews Materials*, 1(5), 1-15. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.18>
- Wichelns, D. (2010). Virtual water: A helpful perspective, but not a sufficient policy criterion. *Water Resources Management*, 24, 2203-2219. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9547-6>
- Wiek, A., & Larson, K. L. (2012). Water, people, and sustainability—A systems framework for analyzing and assessing water governance regimes. *Water Resources Management*, 26(11), 3153-3171. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0065-6>
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima, S., Salgot, M., Collado, J., Hernandez, F., & Torricelli, R. (2010). The Wealth of Waste. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/4/i1629e/i1629e.pdf>
- Wu, X., Wen, Q., Hu, L., & Liu, M. (2020). Evaluation of unconventional water resources based on knowledge granularity. *E3S Web of Conferences*, 144, 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014401004>
- Yazdandoost, F., Noruzi, M. M., & Yazdani, S. A. (2021). Sustainability assessment approaches based on water-energy Nexus: Fictions and nonfictions about non-conventional water resources. *Science of the Total Environment*, 758, 143703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143703>
- Yulmetov, R., & Løset, S. (2017). Validation of a numerical model for iceberg towing in broken ice. *Cold Regions Science and Technology*, 138, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.03.002>
- Zhang, Y., Zhang, Y., Shi, K., & Yao, X. (2020). Research development, current hotspots, and future directions of water science in China. *Water*, 12(1), 136. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9107-1>
- Zhao, Y., He, G., Wang, J., Gao, X., Li, H., Zhu, Y., & Jiang, S. (2020). Water stress assessment integrated with virtual water trade and physical transfer water: A case study of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 708, 134578. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134578>