Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

A review on the reliability analysis of rainwater harvesting systems from rooftop catchments

Hadi Memarian[*1]
1. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Review Paper

Article history

Received: 12 October 2024

Revised: 08 November 2024

Accepted: 11 December 2024

Published online: 31 December 2024

Keywords:
Reliability, sustainability, innovation, climate change, maintenance, filteration.

ABSTRACT

Rainwater harvesting (RWH) systems represent a sustainable approach to managing freshwater resources, especially in regions with limited water supply. The effectiveness of these systems is critically influenced by policy, design, and climatic conditions. Policies and regulations are foundational to the reliability of RWH systems. They establish standards for system components, ensuring safety and preventing failures. Effective policies encourage RWH adoption by providing guidelines for design standards and incentives such as rebates. Regular maintenance and safety checks mandated by regulations contribute to system reliability, with policies also influencing the permissible uses of harvested rainwater, which can range from non-potable to potable applications. Several factors interplay to determine the reliability of RWH systems: Climatic Conditions: Rainfall frequency, intensity, and distribution are essential for water collection. Erratic rainfall makes systems less reliable. System Design: Properly designed systems tailored to local climatic patterns improve reliability. Key design elements include catchment area, storage capacity, and filtration mechanisms. Geographical Considerations: Variability in reliability across different settings necessitates context-specific designs to maximize effectiveness and cost-efficiency. Advancements in technology enhance RWH systems' reliability and efficiency. Innovations contribute to better integration into urban planning, addressing challenges posed by climate change and urbanization. As technology evolves, RWH systems are expected to become integral to sustainable urban design. Reliability analysis incorporates water balance simulations, statistical analysis, and modeling approaches, aiding in the design and evaluation of systems against climatic variability. This comprehensive approach ensures a consistent water supply, particularly in water-scarce regions. Studies indicate favorable benefit-cost ratios for RWH systems when appropriately designed. Cost-benefit analyses in various settings show that these systems can be economically viable and environmentally beneficial, supporting water conservation efforts. In conclusion, the integration of effective policies, innovative designs, and aquifer recharging projects, with reliability analysis methodologies, is crucial for the success of RWH systems. These systems play a significant role in sustainable water management, especially in the face of increasing water scarcity challenges.

Citation: Memarian, H. (2024). A Review on the reliability analysis of rainwater harvesting systems from rooftop catchments, *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(4), 109-122.
DOI:

Publisher: Iranian Rainwater Catchment Systems Association
© Author(s)

***Corresponding author:** Hadi Memarian
Address: Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
Tel: 09155320032
Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
Online ISSN: 1531-2783 Print ISSN: 5970-2423

A review on the reliability analysis of rainwater harvesting systems from rooftop catchments

Hadi Memarian[1]*
1. Associate Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Rainwater harvesting (RWH) systems have been a fundamental aspect of human water management since ancient times, with origins tracing back to 5,000 BC in the Indus Valley. The technology has evolved over the centuries, significantly enhancing urban infrastructure through the establishment of large cisterns during the Roman Empire. In contemporary contexts, RWH systems are increasingly recognized for their sustainability, particularly in light of escalating challenges posed by climate change and urbanization. These systems effectively capture, divert, and store rainwater from various surfaces, providing a crucial alternative water source for non-potable uses, including irrigation, toilet flushing, and laundry, and even enabling treatment for potable applications.

Materials and Methods: A typical RWH system comprises several key components: Collection Surfaces: Roofs or other surfaces that capture rainfall. Gutters: Channels that direct water from the collection surfaces. Filters: Systems that remove debris and contaminants from the rainwater. Storage Tanks: Containers that store the harvested rainwater for later use. Treatment Systems: Technologies that purify rainwater for potable use. The reliability of RWH systems hinges on various analytical methodologies designed to assess their effectiveness in supplying sustainable water. Key methods include: Water Balance Simulation: This technique evaluates the inflow (rainfall) against outflows (usage and evaporation) to determine necessary storage capacities. Statistical Analysis: Historical rainfall data is analyzed to predict future patterns and water shortages, often using probability distributions. Mass Curve Analysis: This graphical method plots cumulative water supply against demand, highlighting periods of surplus and deficit. Probabilistic Methods: Techniques like Monte Carlo simulations account for uncertainties in rainfall and demand, yielding a range of potential outcomes. Economic Optimization: This aspect evaluates cost-effectiveness, balancing the costs of system construction and maintenance against the benefits of a reliable water supply.

Results and Discussion: The effectiveness of RWH systems varies significantly across different environmental settings, necessitating tailored designs that consider local climatic conditions, water demands, and usage patterns. For example, urban areas may require compact systems due to space constraints, while agricultural regions might need larger storage capacities to ensure consistent water availability. Additionally, the reliability of RWH systems is affected by climate change, which introduces uncertainties in rainfall patterns and water availability. Adaptive design and management practices are essential to maintain system reliability under these changing conditions. To enhance the reliability of RWH systems, several best practices should be followed: Site Assessment: Conduct thorough evaluations of local rainfall patterns and water demands. Material Selection: Choose non-toxic, durable catchment surfaces and materials. First-Flush System: Implement systems to divert the initial rainwater, which may contain contaminants. Proper Sizing: Ensure storage tanks are adequately sized for local conditions. Regular Maintenance: Perform routine cleaning and maintenance of gutters, downspouts, and filters to optimize performance. Design Flexibility: Adapt designs to local climatic and usage conditions to maximize efficiency. Incorporate Reliability Metrics: Utilize time-based and volumetric metrics to assess system performance. Policy Support: Engage with governmental policies and subsidies that encourage the adoption of RWH systems.

Conclusion: Advancements in technology are enhancing the reliability and efficiency of RWH systems, integrating them into urban landscapes. With supportive policies and ongoing innovation, RWH systems can significantly contribute to sustainable water management, helping to address the challenges of climate change and urban growth. The insights gained from reliability analyses and case studies provide valuable guidance for the future design and implementation of RWH systems, ensuring they meet the demands of diverse environments and communities. As climate change continues to affect water resources, the adaptability and effectiveness of RWH systems will be crucial in achieving water security and sustainability.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

ISSN (Online): 2783-1531 - ISSN (Print): 2423-5970

Ethical Considerations

Data availability statement: The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.
Funding: Financial support: This research was conducted as an independent research without any financial support.
Authors' contribution: Hadi Memarian as the author of the paper, conducted all parts of the research and wrote the whole manuscript.
Conflicts of interest: The author of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.
Acknowledgment: The author thanks and appreciates the esteemed referees who completed the review process of the article.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems
مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران ایران
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۵۳۱ شاپا چاپی:۲۴۲۳-۵۹۷۰

مروری بر تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران از سطوح پشت‌بام

هادی معماریان* [۱]

۱. دانشیار، گروه آبخیزداری و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، hadi_memarian@birjand.ac.ir

مشخصات مقاله

نوع مقاله:
مروری

تاریخچه مقاله
دریافت: ۲۱ مهر ۱۴۰۳
بازنگری: ۱۸ آبان ۱۴۰۳
پذیرش: ۲۱ آذر ۱۴۰۳
انتشار برخط: ۱۱ دی ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
قابلیت اطمینان، پایداری، نوآوری، تغییر اقلیم، تعمیر و نگهداری، تصفیه.

چکیده

سامانه‌های استحصال آب باران رویکردی پایدار در مدیریت منابع آب شیرین، به‌ویژه در مناطقی با عرضه محدود آب تلقی می شوند. اثربخشی این سامانه‌ها به شدت تحت تأثیر سیاست‌ها، نوع طراحی و شرایط آب و هوایی است. تعیین خط مشی‌ها و مقررات در طراحی و اجرا، پایه و اساس قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران هستند. این مقررات استانداردهایی را برای اجزای سامانه، تضمین ایمنی و جلوگیری از خرابی آن ایجاد می‌کنند. سیاست‌های مؤثر با ارائه دستورالعمل‌هایی برای استانداردهای طراحی و مشوق-هایی مانند یارانه، پذیرش سیستم‌های جمع‌آوری آب باران را راحت‌تر می‌کنند. تعمیر و نگهداری منظم و بررسی‌های ایمنی الزامی شده توسط مقررات به قابلیت اطمینان سیستم کمک می‌کند، با اعمال سیاست-هایی که بر استفاده‌های مجاز از آب باران استحصال شده نیز تأثیر می‌گذارد، که می‌تواند از کاربردهای غیرقابل شرب تا قابل شرب متغیر باشد. عوامل متعددی در تعیین قابلیت اطمینان این سامانه‌ها مؤثر هستند که عبارتند از: شرایط اقلیمی: فراوانی، شدت و توزیع بارندگی برای جمع‌آوری آب ضروری است. بارندگی نامنظم قابلیت اعتماد سامانه‌ها را کاهش می‌دهد. طراحی سامانه: سامانه‌های طراحی شده مناسب که با الگوهای آب و هوایی محلی طراحی شده‌اند، قابلیت اطمینان را بهبود می بخشند. عناصر کلیدی طراحی شامل حوضه آبریز، ظرفیت ذخیره‌سازی و ساز و کارهای تصفیه است. ملاحظات جغرافیایی: تفاوت در قابلیت اطمینان در تنظیمات مختلف سامانه، طراحی‌های مناسب مربوطه را برای به حداکثر رساندن اثربخشی و کارایی هزینه انجام شده ضروری می‌نماید. پیشرفت‌های فناوری باعث افزایش قابلیت اطمینان و کارایی سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌شود. نوآوری‌ها به برنامه‌ریزی شهری بهتر و به حل چالش‌های ناشی از تغییرات آب و هوا و شهرنشینی کمک می‌کنند. همانطورکه فناوری‌ها تکامل و توسعه می‌یابند، انتظار می‌رود سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به یک طرح شهری پایدار تبدیل شوند. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان شامل شبیه‌سازی‌های بیلان آب، تجزیه و تحلیل آماری، و رویکردهای مدل‌سازی است که به طراحی و ارزیابی سیستم‌ها در برابر تغییرات آب و هوایی کمک می‌کند. این رویکرد جامع، تأمین آب پایدار را به‌ویژه در مناطق کم‌آب تضمین می‌نماید. مطالعات نشان می‌دهد که نسبت سود به هزینه برای سامانه‌های جمع‌آوری آب باران در صورت طراحی مناسب، مطلوب و بهینه خواهد بود. تجزیه و تحلیل هزینه و فایده در تنظیمات مختلف سیستم نشان می‌دهد که این سامانه‌ها می توانند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و از نظر زیست محیطی مفید باشند و از تلاش‌های مرتبط با صرفه‌جویی در آب نیز حمایت کنند. در نتیجه، ادغام سیاست‌های مؤثر، طرح‌های نوآورانه، طرح‌های تغذیه و مدیریت آبخوان، و روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان برای موفقیت سامانه‌های جمع‌آوری آب باران بسیار مهم است. این سامانه‌ها نقش بسزایی در مدیریت پایدار آب به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های روزافزون کمبود آب دارند.

استناد: معماریان، هادی. (۱۴۰۳). مروری بر تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران از سطوح پشت‌بام. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۱۲(۴)، ۱۰۹-۱۲۲.

DOI:

ناشر: انجمن علمی سیستم‌های سطوح آبگیر باران ایران

© نویسندگان

* **نویسنده مسئول:** هادی معماریان
نشانی: گروه آبخیزداری و گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
تلفن: ۰۹۱۵۵۳۲۰۰۳۲
پست الکترونیکی: hadi_memarian@birjand.ac.ir

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

مقدمه

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران نوعی فناوری باستانی بوده که به‌دلیل پایداری و کارایی آن‌ها در مدیریت آب، محبوبیت دوباره‌ای پیدا کرده‌اند. از نظر تاریخی، این سامانه‌ها جزئی از تمدن بشری بوده و شواهدی از آن‌ها وجود دارند که مربوط به ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد در دره سند است، یعنی جایی که سامانه‌های تأمین آب پیشرفته سنگ بنای فرهنگی آن تمدن بودند. بیش‌تر این سامانه‌ها را امپراتوری روم توسعه داد و مخازن بزرگی را برای تأمین عمومی آب ایجاد کرد و اهمیت جمع‌آوری آب باران را در برنامه‌ریزی شهری و توسعه زیرساخت نشان داد (Ortiz and Rao, 2004; Komeh et al., 2017; Hofman-Caris et al., 2019; VS and Jacob, 2023). نمونه‌های بسیار کاربردی از این سامانه‌ها مثل آب انبارها و بندسارها و قنات‌ها در تمدن غنی ایران باستان و ایران پس از اسلام نیز به وفور یافت می‌شود (Memarian and Tajbakhsh, 2023).

در عصر مدرن، برداشت آب باران به‌دلیل نقشی که در مدیریت پایدار آب دارد، به‌ویژه زمانی که تغییرات اقلیمی و شهرنشینی فشار بر منابع آب را افزایش می‌دهد، بیش‌تر شناخته شده است. این سامانه‌ها آب باران را از پشت‌بام‌ها و سطوح دیگر جمع‌آوری، منحرف و ذخیره می‌کنند و منبع آب جایگزینی را فراهم می‌کنند که می‌تواند برای مقاصد غیرشرب مانند آبیاری، شستشوی توالت‌ها و لباس‌شویی استفاده شود یا حتی با استانداردهای قابل‌شرب تصفیه شود. اجزای یک سامانه معمولی شامل سطوح جمع‌آوری، ناودان‌ها، فیلترها، مخازن ذخیره‌سازی و سامانه‌های تصفیه است که تضمین می‌کند آب برداشت‌شده ایمن و قابل استفاده است (Ray et al., 2022; Silva and de Souza, 2019; Amos et al., 2016; Abdulla and Al-Shareef, 2009).

اهمیت روزافزون استحصال آب باران در مدیریت پایدار آب چند وجهی است. این امر، تقاضا برای منابع آب شهری را کاهش می‌دهد، تأثیر رواناب حاصل از تندرهای رگباری را کاهش داده و می تواند به‌عنوان یک منبع آب حیاتی در طول دوره‌های خشکسالی باشد. علاوه‌براین، با استفاده از یک منبع طبیعی، که در غیر این صورت به هدر می‌رود، به حفظ منابع استراتژیک آب کمک می‌کند. در مناطق شهری، جایی که سطوح غیرقابل نفوذ مانع از نفوذ طبیعی آب باران می‌شوند، این سامانه‌ها می‌توانند فشار بر زیرساخت‌های جمع‌آوری رواناب را کاهش داده و خطرات سیلاب شهری را کم کنند (Qi et al., 2019; Raimondi et al., 2023; Memarian and Tajbakhsh, 2023). علاوه‌براین، جمع‌آوری آب باران با راهبردهای مدیریت آب شهری یکپارچه، که هدف آن مدیریت کل‌نگر آب، زمین و منابع مرتبط برای به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی بدون به خطر انداختن پایداری بوم‌سازگان بوده، هماهنگ است. با گنجاندن استحصال آب باران در این راهبردها، شهرها نیز می‌توانند در برابر اثرات تغییرات آب و هوایی مقاوم‌تر شده و از تأمین آب قابل اعتماد برای نسل‌های آینده اطمینان حاصل کنند (Chen et al., 2016; Qi et al., 2019; Eyni and Deletic, 2023).

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران گواهی بر نبوغ بشر در حفظ آب هستند که از شیوه‌های تاریخی برای برطرف کردن چالش‌های معاصر بهره می‌برند. ادغام آن‌ها در شیوه‌های مدیریت پایدار آب نه تنها یک منبع حیاتی را حفظ می‌کند، بلکه نشان‌دهنده رویکردی فعال برای نظارت و انعطاف‌پذیری محیط زیست در مواجهه با آب و هوای متغیر است. بنابراین، شناخت روش‌های مختلف ارزیابی عملکرد این سامانه‌ها و روش‌های مختلف ارزیابی قابلیت اطمینان آن‌ها در رفع نیازهای شهری و روستایی بسیار مهم است (Pacey and Cullis, 1986; Appan, 2000; Khanal et al., 2020; Pari et al., 2023).

سامانه‌های استحصال آب باران یک رویکرد پایدار برای مدیریت منابع آب شیرین، به‌ویژه در مناطقی با عرضه محدود آب هستند. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان این سامانه‌ها بسیار مهم است زیرا اثربخشی آن‌ها را در تأمین تقاضای آب در شرایط مختلف تعیین می‌کند. مطالعه‌ای که در پایتخت استرالیا انجام شد قابلیت اطمینان این سامانه‌ها را برای استفاده در توالت و لباسشویی ارزیابی کرد و نمرات قابلیت اطمینان بالایی را از ۸۰ تا ۱۰۰ درصد به آن‌ها اختصاص داد. با این حال، قابلیت اطمینان برای آبیاری در مکان‌های مختلف به‌طور قابل توجهی متفاوت بود. این امر اهمیت ملاحظات جغرافیایی در طراحی سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را برجسته می‌کند (Preeti and Rahman, 2021). در منطقه مدنین تونس با کشاورزی غالباً دیمکاری، قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران با استفاده از شبیه‌سازی بیلان آب مورد ارزیابی قرار گرفت. این مطالعه بر سازگاری این سامانه‌ها با شرایط خشک تأکید می‌کند که می‌توانند منبع قابل اعتمادی از آب برای کشاورزی را فراهم نمایند (Adham et al., 2021). مطالعه موردی دیگری نیز از دانشگاه آریزونا تجزیه و تحلیل هزینه–فایده سامانه‌های جمع‌آوری آب باران در ساختمان‌های این دانشگاه را ارائه کرد. این مطالعه بر قابلیت اقتصادی و مزایای زیست‌محیطی ادغام سامانه‌های جمع‌آوری آب باران در زیرساخت‌های شهری تأکید دارد (Corneliussen, 2018).

تنوع در قابلیت اطمینان سامانه در شرایط مختلف، نیاز به سامانه‌های مناسب استحصال آب باران که آب و هوای محلی، تقاضای آب و الگوهای استفاده را در نظر می‌گیرند، ضروری می‌نماید. به‌عنوان مثال، در محیط‌های شهری که فضا محدود است، سامانه‌های فشرده با

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

راه‌حل‌های کارآمد ذخیره‌سازی بسیار ضروری است. در مقابل، مناطق کشاورزی به ظرفیت‌های ذخیره‌سازی بزرگ‌تری برای اطمینان از تأمین پایدار آب برای محصولات کشاورزی در دوره‌های خشک نیاز دارند (Ross et al., 2022; Wartalska et al., 2024).

تحلیل اقتصادی یکی دیگر از جنبه‌های حیاتی سامانه‌های استحصال آب باران است. مطالعه‌ای در استرالیا نشان داد که با اندازه مخازن و مساحت مناسب سقف، نسبت سود به هزینه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌تواند مطلوب باشد و نشان می‌دهد که این سامانه‌ها می‌توانند راه‌حل مقرون‌به‌صرفه‌ای برای حفظ آب باشند، به‌ویژه زمانی که برای مطابقت با نیازهای خاص منطقه طراحی می‌شوند (Preeti and Rahman, 2021). درس‌هایی که از این مطالعات موردی به‌دست می‌آیند بسیار متنوع‌اند و نشان می‌دهند درحالی‌که سامانه‌های جمع‌آوری آب باران بسیار سودمند هستند، طراحی آن‌ها باید برای به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان و مقرون‌به‌صرفه بودن، مختص آن زمینه کاربردی خاص باشد. این مطالعات هم‌چنین نشان می‌دهند که سطوح مختلفی از سیاست‌ها و یارانه‌های تشویقی باید بر ورودی‌های حساس به تغییرات آب و هوا اعمال شوند تا پذیرش سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را برای مردم ممکن‌تر و آسان‌تر نمایند. در نتیجه، استفاده از تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در سامانه‌های استحصال آب باران در مکان‌های جغرافیایی مختلف، بینش ارزشمندی را در مورد عملکرد آن‌ها ارائه می‌کند و به طراحی و اجرای راهبردهای مدیریت آب کارآمدتر، مقرون‌به‌صرفه‌تر و پایدارتر می‌انجامد (Adham et al., 2021). و از آن‌جایی که کمبود آب در سرتاسر جهان به یک موضوع بحرانی و مشکلی فزاینده تبدیل شده است، درس‌های آموخته شده از بررسی این مطالعات موردی در هدایت ابتکارات مرتبط با استحصال آب باران در آینده بسیار مفید خواهد بود.

مواد و روش‌ها

اجزای سامانه و طراحی

یک سامانه معمولی جمع‌آوری آب باران رویکردی پایدار برای مدیریت آب است که آب باران را برای استفاده در آینده، استحصال، منحرف و ذخیره می‌کند. اجزای اولیه چنین سامانه‌ای شامل حوزه آبریز بالادست، سامانه انتقال، مخازن ذخیره‌سازی، فرآیندهای تصفیه و مکانیسم‌های توزیع است. حوزه آبریز، معمولاً یک پشت‌بام یا سطحی نفوذناپذیر، به‌عنوان نقطه جمع‌آوری اولیه آب باران عمل می‌کند. این منطقه برای به حداکثر رساندن جمع‌آوری آب و در عین حال به حداقل رساندن آلودگی طراحی شده است. سامانه انتقال که شامل ناودان‌ها و کانال‌ها است، آب را از حوزه آبریز به مخازن ذخیره منتقل می‌کند. این مخازن اغلب از مواد رزین پلی‌استر به رنگ سبز برای کاهش رشد باکتری‌ها یا استیل و یا سنگ و سیمان ساخته می‌شوند. قبل از این‌که آب ذخیره شده قابل استفاده باشد، باید تحت فرآیندهای تصفیه قرار گیرد تا اطمینان حاصل شود که استانداردهای کیفی مورد نیاز را برآورده می‌کند که معمولاً شامل فیلتراسیون برای حذف ذرات و ضدعفونی برای از بین بردن عوامل بیماری‌زا است. در نهایت، مکانیسم توزیع، که ممکن است شامل پمپ‌ها و لوله‌ها باشد، آب تصفیه‌شده را به محل استفاده خود می‌رساند، خواه برای آبیاری، شستشوی توالت‌ها یا حتی استفاده‌های آشامیدنی، البته در صورت تصفیه کافی. این سامانه هم‌چنین شامل چندین مؤلفه کمکی است مانند انحراف دهنده‌های اولین فلاش، که آب اولیه جمع‌آوری شده را که ممکن است حاوی آلاینده‌هایی از سطح حوضه باشد، دور می‌اندازد و مکانیسم‌های سرریز برای کنترل آب اضافی (Pacey and Cullis, 1986; Memarian et al., 2015). سامانه‌های کنترل و نظارت برای مدیریت سطح آب و اطمینان از عملکرد صحیح سامانه تصفیه نیز ضروری هستند. در برخی موارد، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران ممکن است ویژگی‌های پیشرفته‌ای مانند جلوگیری از جریان برگشتی برای محافظت از سلامت سیستم آب جبرانی و دبی‌سنج‌ها همراه با ثبت‌کننده‌های داده برای اندازه‌گیری تولید آب را در خود داشته باشند. ملاحظات منبع تغذیه انرژی نیز بسیار مهم است، با گزینه‌هایی از منابع معمولی گرفته تا منابع جایگزین مانند سامانه‌های خورشیدی، که پایداری سیستم را افزایش می‌دهند. طراحی و پیچیدگی یک سامانه جمع‌آوری آب باران بسته به استفاده نهایی موردنظر از آب برداشت شده، الگوهای بارندگی محل، و الزامات خاص سایت می‌تواند بسیار متفاوت باشد (Khanal et al., 2020; Pari et al., 2023).

معیارهای قابلیت اطمینان

در ارزیابی سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، قابلیت اطمینان یک عامل حیاتی است که دسترسی ثابت و پایدار به آب جمع‌آوری شده را برای مصارف مورد نظر تضمین می‌کند. معیارهای قابلیت اطمینان مبتنی بر زمان، بر مدت زمانی تمرکز می‌کنند که سامانه می‌تواند به اندازه کافی تقاضای آب را بدون مشکل برآورده کند. این سنجه‌ها شامل Mean Time Between Failures (MTBF) است که میانگین زمان بین شکست‌های سامانه را اندازه‌گیری می‌کند، و Mean Time to Repair (MTTR) که میانگین زمان لازم برای تعمیر یک سامانه را پس از وقوع یک خرابی اندازه‌گیری می‌نماید. این معیارها به‌ویژه در زمینه‌هایی که تأمین مداوم آب بسیار مهم است، مانند ساختمان‌های مسکونی یا تجاری که برای مصارف غیرشرب به آب باران متکی هستند، اهمیت دارند (Martínez-Acosta et al., 2019; Teston et al., 2022).

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

از سوی دیگر، قابلیت اطمینان با سنجه قابلیت اطمینان حجمی (VR) نیز اندازه‌گیری می‌شود که نسبت عرضه آب باران به تقاضا را در یک دوره خاص، محاسبه می‌نماید. این معیار در مناطقی با الگوهای بارندگی متغیر ضروری است، زیرا به طراحی ظرفیت‌های ذخیره‌سازی که می‌توانند برای تحمل دوره‌های خشک مناسب باشند، کمک می‌کند. قابلیت اطمینان حجمی بالا نشان می‌دهد که سامانه می‌تواند توانایی تأمین آب را حتی در دوره‌های طولانی مدت کم بارش نیز حفظ کند، که برای مناطق مستعد خشکسالی یا با توزیع بارش فصلی بسیار حیاتی است (Hanson and Vogel, 2014; Memarian et al., 2015).

معیارهای قابلیت اطمینان حجمی و مبتنی بر زمان برای مدیریت مؤثر و بهینه‌سازی سامانه‌های آب باران ضروری هستند. این معیارها دیدگاه مفیدی را درباره انعطاف‌پذیری سامانه و برنامه‌های تعمیر و نگهداری و طراحی سامانه‌های اضافی را برای اطمینان از تأمین پایدار آب ارائه می‌کنند. در برنامه‌ریزی شهری، این معیارها از توسعه راهبردهای مدیریت پایدار آب نیز پشتیبانی می‌کنند که می‌تواند فشار بر منابع آب شهری را کاهش دهد و خودکفایی جوامع را نیز ارتقا ببخشد. علاوه‌براین، در زمینه تغییرات آب و هوایی، که در آن الگوهای آب و هوا به‌طور فزاینده‌ای غیر قابل پیش‌بینی هستند، این معیارهای قابلیت اطمینان در انطباق با سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برای تضمین امنیت آبی، حیاتی‌تر و الزام‌آورتر می‌شوند (Shin et al., 2018; Morales-Figueroa et al., 2023).

روش‌شناسی تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع آوری آب باران یک فرآیند چندوجهی است که شامل روش‌های مختلفی برای اطمینان از اثربخشی سامانه‌ها در تأمین پایدار آب است. یکی از روش‌های اولیه مورد استفاده، شبیه‌سازی بیلان آب است که تعادل بین ورودی‌های آب مانند بارندگی و خروجی‌ها مانند مصرف و تبخیر را در یک دوره معین محاسبه می‌کند. این شبیه سازی به تعیین اندازه مخازن ذخیره مورد نیاز برای برآورده کردن تقاضا در دوره‌های خشک کمک زیادی می‌کند. تجزیه و تحلیل آماری روش مهم دیگری است که شامل بررسی داده‌های تاریخی بارندگی برای پیش‌بینی الگوهای آینده و احتمال کمبود آب می‌شود. این تحلیل می‌تواند شامل استفاده از توزیع‌های احتمال برای تخمین فراوانی و مدت خشکسالی باشد، که برای طراحی سامانه‌هایی که در برابر شرایط آب و هوایی مختلف انعطاف‌پذیر هستند، ضروری است (Adham et al., 2021; Preeti and Rahman, 2021).

روش‌های مدل‌سازی، مانند مدل بیلان آب روزانه، برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران تحت سناریوهای مختلف استفاده می‌شوند. این مدل‌ها داده‌های بارندگی روزانه، نرخ تبخیر، تقاضای آب و ظرفیت ذخیره‌سازی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه در طول زمان در نظر می‌گیرند (Adham et al., 2021). به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای که در یونان انجام شد، یک مدل بیلان آب روزانه را برای تعیین اندازه بهینه مخازن آب باران برای آبیاری در کشاورزی گلخانه‌ای، با در نظر گرفتن نیاز آبی محصولاتی مانند گوجه‌فرنگی و گل بگونیا به‌کار برد (Gwoździej-Mazur et al., 2022). به‌طور مشابه، تحقیقاتی در تونس نیز توانست قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را با استفاده از شبیه‌سازی بیلان آب در هر دو شرایط مبتنی بر زمان و حجم، ارزیابی کند و چشم‌اندازی را در مورد عملکرد سامانه در مناطق تحت کشاورزی دیم ارائه دهد (Goh and Ideris, 2021). علاوه‌براین، تجزیه و تحلیل منحنی جرم[1]، شیوه دیگری است که عرضه آب تجمعی را در برابر تقاضای تجمعی در طول زمان ترسیم می‌کند و دوره‌های مازاد و کسری را نشان می‌دهد. این نمایش گرافیکی به تجسم رفتار سامانه و شناسایی نقاط بحرانی که در آن تقاضا بیش از عرضه است کمک می‌کند (Komeh et al., 2017). روش‌های احتمالی، مانند شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نیز برای توضیح عدم قطعیت در بارندگی و تقاضا استفاده می‌شوند و طیفی از نتایج ممکن را به جای یک نتیجه قطعی ارائه می‌دهند. این رویکرد به درک خطرات مرتبط با عدم موفقیت سامانه در تأمین نیازهای آبی کمک می‌کند (Paxton et al., 2001; Komeh et al., 2017; Gonzalez et al., 2018).

بهینه‌سازی اقتصادی جنبه دیگری از تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان است که در آن مقرون به صرفه بودن گزینه‌های طراحی مختلف ارزیابی می‌شود. این شامل مقایسه هزینه‌های ساخت و نگهداری سامانه با مزیت تأمین آب قابل اعتماد است که اغلب منجر به یک مبادله و یا جبران بین قابلیت اطمینان سامانه و هزینه اجرا می‌شود. هدف یافتن تعادل بهینه‌ای است که امنیت آب را به حداکثر و در عین حال هزینه‌ها را به حداقل برساند (Ostfeld, 2012; Memarian et al., 2015; Memarian et al., 2017; Nyahora et al., 2020; Müller et al., 2021). در نتیجه، تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران یک فرآیند جامع است که شبیه‌سازی بیلان آب، تجزیه و تحلیل آماری و رویکردهای مدل‌سازی مختلف را برای طراحی و ارزیابی سامانه‌هایی که می‌توانند در برابر تغییرات اقلیمی مقاومت کرده یا سازگار شده و تأمین آب پایدار را تضمین کنند، ادغام می‌کند. این روش‌ها در مجموع به توسعه سامانه‌های جمع‌آوری آب باران قوی

[1] Mass curve analysis

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

و کارآمد کمک می‌کنند که می‌توانند نقش مهمی در مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطقی که با چالش‌های کمبود آب مواجه هستند، ایفا نمایند (Khanal et al., 2020; Razali et al., 2023).

نتایج و بحث

عوامل مؤثر بر قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران تحت تأثیر عوامل متعددی قرار می‌گیرد که هرکدام برای تعیین اثر بخشی و پایداری کلی سیستم در تعامل با یکدیگر هستند. شرایط آب‌وهوایی بسیار مهم است. فراوانی، شدت و توزیع بارندگی مستقیماً بر حجم آبی که می‌توان جمع‌آوری کرد تأثیر می‌گذارد. در مناطقی با بارندگی نامنظم یا کمیاب صرفاً تکیه به استحصال آب باران دشوار خواهد بود. یک سامانه خوب طراحی شده متناسب با الگوهای آب‌وهوایی محلی و تقاضای کاربر می‌تواند قابلیت اطمینان را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Khanal et al., 2020; Fioramonte et al., 2022; Gee and Sojka, 2022).

رویه‌های نگهداری سامانه شامل تمیز کردن منظم ناودان‌ها، بازرسی مخازن ذخیره‌سازی از نظر نشتی یا آلودگی، و بررسی فیلترها برای اطمینان از عملکرد بهینه و جلوگیری از خرابی سامانه ضروری است. بی‌توجهی در نگهداری می‌تواند منجر به کاهش کیفیت و کمیت آب شود و در نهایت قابلیت اطمینان سامانه را به خطر بیندازد (Memarian et al., 2016). الگوهای تقاضای کاربر یا مصرف‌کننده نیز نقش مهمی دارند. سامانه‌ها باید با در نظر گرفتن هر دو زمان استفاده در اوج و خارج از اوج طراحی شوند تا اطمینان حاصل شود که میزان تقاضا از عرضه تجاوز نمی‌کند. علاوه‌براین، آموزش کاربر در مورد صرفه‌جویی در آب و اهمیت نگهداری منظم می‌تواند حس مالکیت و مسئولیت را تقویت کند و منجر به سامانه‌هایی با مدیریت بهتر شود. به‌طور خلاصه، قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران یک تعامل پیچیده از شرایط آب‌وهوایی، طراحی سامانه، شیوه‌های نگهداری و الگوهای تقاضای کاربر است. هر عامل باید به دقت برای اطمینان از طول عمر و کارایی سامانه مورد توجه قرار گیرد (Memarian et al., 2017; Khanal et al., 2020; Yildirim et al., 2022).

سیاست و مقررات

خط‌مشی و مقررات نقش مهمی در شکل‌دهی به طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران ایفا می‌کنند و به‌طور قابل‌توجهی بر قابلیت اطمینان آن‌ها تأثیر می‌گذارند. سیاست‌های مؤثر با ارائه دستورالعمل‌هایی برای استانداردهای طراحی، پذیرش این سامانه‌ها را ارتقا داده و این اطمینان را ایجاد می‌کنند که سامانه‌هایی با مقاومت در برابر شرایط آب‌وهوایی مختلف و تقاضاهای استفاده متنوع ساخته شده‌اند. مقررات مصارف مجاز آب باران استحصال شده را تعریف می‌کنند، که می‌تواند از کاربردهای غیرشربی مانند آبیاری و شستشوی توالت تا مصارف آشامیدنی باشد، البته مشروط بر این‌که آب جمع‌آوری شده مطابق با استانداردهای ایمنی باشد. قابلیت اطمینان این سامانه‌ها با چارچوب قانونی حاکم بر آن‌ها ارتباط نزدیکی دارد. به‌عنوان مثال، سیاست‌هایی که تعمیر و نگهداری منظم و بررسی کیفیت را الزامی می‌کنند، می‌توانند به ایجاد سامانه‌های قابل اعتمادتری منجر شوند. علاوه‌براین، مشوق‌هایی مانند تخفیف یا یارانه، به‌عنوان بخشی از اقدامات سیاستی، می‌توانند نصب سامانه‌های استحصال آب باران را تشویق کنند، و در نتیجه تأثیر بالقوه آن‌ها را بر موضوع مهم صرفه جویی آب افزایش دهند (Thomas and Lüthi, 2013; Memarian et al., 2016; Khanal et al., 2020; Akter, 2023).

علاوه‌براین، مقرراتی که سامانه‌های استحصال آب باران را در برنامه‌های گسترده‌تر مدیریت آب ادغام می‌کنند، می‌توانند اثربخشی و قابلیت اطمینان آن‌ها را افزایش دهند. با در نظر گرفتن این سامانه‌ها به‌عنوان جزئی از چرخه آب شهری، سیاست‌های گفته شده ایجاد سامانه‌هایی را تسهیل می‌کنند که نه تنها منبع آب پایداری را فراهم می‌نمایند، بلکه به مدیریت رواناب حاصل از رگبارهای تندری و کاهش سیلاب نیز کمک می‌کنند. قابل پیش‌بینی بودن عملکرد سامانه استحصال آب باران نیز تحت تأثیر سیاست قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال، قوانین ساختمانی که به ظرفیت ذخیره‌سازی کافی نیاز دارند، می‌توانند تأمین آب پایدار را در طول دوره‌های خشک تضمین کنند و قابلیت اطمینان سامانه را افزایش دهند. علاوه‌براین، سیاست‌هایی که از تحقیق و توسعه پشتیبانی می‌کنند اغلب منجر به نوآوری در فناوری‌های مرتبط با جمع‌آوری آب باران، بهبود کارایی و قابلیت اطمینان سامانه در طول زمان می‌شوند (Huang et al., 2021; Rodrigues et al., 2023).

تأثیر سیاست بر قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران نیز در ایجاد استانداردهایی برای اجزای سامانه مانند فیلترها و مخازن مشهود است که می‌تواند از خرابی آن و آلودگی آب جلوگیری کند. با تعیین حداقل معیارهای کیفیت، این سیاست‌ها تضمین می‌کنند که سامانه‌های جمع‌آوری آب باران نه تنها قابل اعتماد هستند، بلکه برای کاربران نیز ایمن هستند. اجرای این سیاست‌ها، از جمله اجرای مقررات و ارائه پشتیبانی فنی، برای قابلیت اطمینان پایدار این سامانه‌ها بسیار ضروری است. بدون اجرای صحیح، حتی سیاست‌هایی که به خوبی طراحی شده‌اند ممکن است نتوانند به نتایج موردنظر خود دست یابند و منجر به سامانه‌های غیرقابل اعتمادی شوند که پتانسیل خود را در

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

حفاظت و پایداری آب نشان نمی‌دهند (Herrmann and Schmida, 1999; Butler, 2018; Rahman et al., 2023). در نتیجه، نقش سیاست و مقررات برای طراحی موفق، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران ضروری است. از طریق ترکیبی از استانداردهای فنی، مشوق‌ها و مکانیسم‌های اجرایی، این سیاست‌ها می‌توانند توسعه سامانه‌های قوی و قابل‌اعتماد را که به‌طور قابل توجهی به شیوه‌های مدیریت پایدار آب کمک می‌کنند، تقویت نمایند.

نوآوری‌ها در فناوری

پیشرفت‌های فناوری اخیر به‌طور قابل توجهی کارآیی و قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران را افزایش داده است. نوآوری‌هایی مانند سامانه‌های نظارت هوشمند که از حسگرها و تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده می‌کنند، اکنون رایج شده‌اند و امکان ردیابی بی‌درنگ سطح آب، کیفیت آب و عملکرد سامانه را فراهم می‌کنند. این سامانه‌های هوشمند هم‌چنین می‌توانند فرآیندهای تصفیه عمدتاً فیزیکی و بعضاً شیمیایی را خودکار کنند تا اطمینان حاصل شود که آب برداشت شده استانداردهای ایمنی را برای استفاده مورد نظر دارد یا خیر؟. علاوه‌براین، ادغام زیرساخت‌های سبز، مانند بام‌های سبز و روسازی‌های نفوذپذیر، جذب و استحصال آب باران را بهبود بخشیده، رواناب را کم‌تر و در نتیجه خطرات سیل را کاهش داده و مدیریت پایدار آب شهری را ارتقا می‌بخشد (Rahman, 2017; Razali et al., 2023; Ortiz and Rao, 2024; Raimondi et al., 2024).

آینده سامانه‌های جمع‌آوری آب باران با توسعه بالقوه فن‌آوری‌های تصفیه پیشرفته‌تر که می‌تواند استفاده از آب باران استحصال شده را برای اهداف گسترده‌تری از جمله کاربردهای آشامیدنی امکان‌پذیر کند، امیدوارکننده به‌نظر می‌رسد. هم‌چنین روند روبه‌رشدی به‌سمت استفاده از سامانه‌های غیرمتمرکز جمع‌آوری آب باران وجود دارد که می‌توانند در طراحی ساختمان‌های جدید گنجانده شده یا در سازه‌های موجود مقاوم‌سازی شوند و یک منبع آب انعطاف‌پذیر و خودپایدار فراهم کنند. ترکیب سامانه‌های جمع‌آوری آب باران با منابع انرژی تجدیدپذیر، مانند صفحات خورشیدی، می‌تواند منجر به سامانه‌های کاملاً مستقلی شود که نه تنها آب باران را جمع‌آوری و ذخیره می‌کنند، بلکه آن را با استفاده از انرژی پاک پمپ و توزیع می‌نمایند (Słyś and Stec, 2020; Murillo-Alvarado and Cárdenas Gil, 2022; Raimondi et al., 2024). علاوه‌براین، انتظار می‌رود استفاده از هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را با پیش‌بینی الگوهای بارندگی و مطلوب‌سازی حجم ذخیره و مصرف آب، بهینه‌سازی نماید. که این موضوع می‌تواند منجر به سامانه‌های بسیار کارآمدی شود که با تغییر شرایط آب‌وهوایی و تقاضای کاربر سازگار می‌شوند و حداکثر صرفه‌جویی در آب را تضمین می‌کنند. استفاده از اینترنت اشیا و نرم‌افزارهای طراحی سامانه‌های جمع‌آوری آب باران نیز به تازگی توانسته است نقش مهمی در خودکارسازی این سامانه‌ها داشته باشد (معماریان، ۱۴۰۱ الف و ب). تحقیق و توسعه مداوم در علم مواد هم‌چنین ممکن است راه‌حل‌های ذخیره‌سازی بادوام‌تر و کارآمدتری را معرفی کند، نیازهای تعمیر و نگهداری را کاهش دهد و دوام طولانی‌مدت سامانه‌های استحصال آب باران را بهبود بخشد (Gee and Sojka, 2022; Judeh et al., 2022; Ganthavee and Trzcinski, 2024).

پیشرفت‌های فناوری باعث می‌شود سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، قابل اطمینان‌تر، کارآمدتر و یکپارچه‌تر با منظر شهری شوند. با ادامه نوآوری و سیاست‌های حمایتی، این سامانه‌ها پتانسیل ایفای نقش مهمی در مدیریت پایدار آب و مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و شهرنشینی دارند. با تکامل این فناوری‌ها، احتمالاً به بخشی جدایی‌ناپذیر از طراحی ساختمان و برنامه‌ریزی شهری تبدیل می‌شوند و به انعطاف‌پذیری و پایداری شهرها در سراسر جهان کمک می‌کنند (Rahman, 2017; Xu et al., 2018).

چالش‌ها و محدودیت‌ها

تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران یک کار پیچیده است که دربرگیرنده چالش‌ها و محدودیت‌های مختلفی است. یکی از نگرانی‌های اولیه کمبود داده‌هایی است که مانع از توانایی پیش‌بینی و ارزیابی دقیق عملکرد این سامانه‌ها می‌شود. بدون اطلاعات کافی از بارندگی و داده‌های مصرف، طراحی سامانه‌هایی که هم کارآمد و هم قابل‌اعتماد باشند دشوار می‌شود. عدم قطعیت مدل چالش مهم دیگری است. مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی سامانه‌های استحصال آب باران باید متغیرهای متعددی مانند الگوهای آب‌وهوا، تقاضای کاربر و ظرفیت ذخیره‌سازی را درنظر بگیرند. با این حال، این مدل‌ها اغلب بر اساس مفروضاتی هستند که ممکن است برای همه سناریوها صادق نباشند، که این موضوع منجر به عدم دقت در ارزیابی قابلیت اطمینان می‌شود. مسأله مقیاس‌پذیری نیز مشکل ایجاد می‌کند، به‌خصوص زمانی‌که سعی می‌شود یک سامانه طراحی شده برای یک مکان خاص، در یک محیط متفاوت با شرایط محیطی و اجتماعی متفاوت اعمال شود. این می‌تواند بر کارآیی سامانه و کیفیت آب استحصال شده تأثیر بگذارد (Shokati et al., 2020; Adham et al., 2021). علاوه‌براین، محدودیت‌های اقتصادی می‌تواند اجرای سامانه‌های پیچیده‌تر و قابل اطمینان‌تر را محدود کند، چراکه باید بین

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

هزینه و عملکرد تعادل ایجاد کرد. الزامات تعمیر و نگهداری، مانند تمیز کردن منظم سطح آبگیر و مخازن برای جلوگیری از آلودگی، لایه دیگری از پیچیدگی را به قابلیت اطمینان این سامانه‌ها اضافه می‌کند (Preeti and Rahman, 2021). علی‌رغم این چالش‌ها، پیشرفت‌ها در فناوری و روش‌ها به‌طور مداوم برای بهبود تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران، با هدف تبدیل آن‌ها به یک منبع آبی پایدارتر، در حال توسعه است.

اثرات تغییر اقلیم

تغییرات آب‌وهوا چالش‌های قابل توجهی را برای قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران ایجاد می‌کند، که این سامانه‌ها به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان یک راه‌حل مدیریت آب پایدار پذیرفته می‌شوند. تغییرپذیری و غیرقابل پیش‌بینی بودن الگوهای بارش، که با تغییرات آب‌وهوایی تشدید نیز شده است، به‌طور مستقیم بر عملکرد و قابلیت اطمینان این سامانه‌ها تأثیر می‌گذارد. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات آب‌وهوایی طولانی مدت بر پتانسیل استحصال آب باران تأثیر می‌گذارند و نیاز به انطباق طراحی این سامانه‌ها با شرایط اقلیمی برای سازگاری با این تغییرات احساس می‌شود. به‌عنوان مثال، افزایش شدت رویدادهای شدید بارندگی می‌تواند منجر به بارگذاری بیش از حد بر سامانه‌های جمع‌آوری آب باران شود، درحالی‌که خشکسالی‌های طولانی می‌تواند منجر به کمبود آب شود و قابلیت اطمینان سامانه را تضعیف کند (Islam, 2023; Rodrigues et al., 2023; Silva et al., 2023; Xu et al., 2023).

علاوه‌براین، دوام اقتصادی سامانه‌های جمع‌آوری آب باران به قابلیت اطمینان آن‌ها گره خورده است که تحت تأثیر تغییرات بارندگی ناشی از آب‌وهوا است. تجزیه و تحلیل جامع این سامانه‌ها تحت شرایط آب‌وهوایی مختلف نشان داد که نتایج مالی این سامانه‌ها بسیار متفاوت است، و نشان می‌دهد که عملکرد اقتصادی باید در کنار عوامل اقلیمی هنگام ارزیابی قابلیت اطمینان آن‌ها درنظر گرفته شود (Khanal et al., 2020; Shiguang and Yu, 2021). علاوه‌براین، ارزیابی سامانه‌های استحصال آب باران در محیط‌های شهری تحت سناریوهای تغییر اقلیم نشان داد که درحالی‌که تغییرات آب‌وهوایی ممکن است تأثیر حداقلی بر سامانه در برخی مناطق داشته باشد، می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر قابلیت اطمینان فصلی آن‌ها تأثیر بگذارد، که برای اطمینان از تأمین آب پایدار در طول سال بسیار مهم است (Toosi et al., 2020).

برای افزایش انعطاف‌پذیری این سامانه‌ها در برابر تغییرات آب‌وهوایی، ادغام و گنجاندن پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی در فرآیند برنامه‌ریزی و طراحی بسیار ضروری است. این مسأله شامل درنظر گرفتن فراوانی و شدت رویدادهای بارندگی، پتانسیل دوره‌های خشک طولانی مدت و تغییرات کلی در چرخه هیدرولوژی است. با انجام این کار، سامانه جمع‌آوری آب باران را می‌توان برای جذب و ذخیره آب باران کافی در طول دوره‌های مرطوب بهینه کرد تا کمبود در طول دوره‌های خشک جبران شود. علاوه‌براین، ترکیب روش‌های ارزیابی خطر و اتخاذ استانداردهای طراحی انعطاف‌پذیر که با تغییر شرایط آب‌وهوایی سازگار می‌شوند، می‌توانند قابلیت اطمینان و پایداری طولانی مدت سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را بهبود بخشند (Khanal et al., 2020; IPCC, 2022; US-EPA, 2011).

به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت اثرات تغییر اقلیم بر قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران چندوجهی است و به یک رویکرد پویا برای طراحی و مدیریت سامانه نیاز دارد. با تصدیق عدم قطعیت‌های دیکته شده توسط تغییرات آب‌وهوایی و انطباق فعالانه طرح‌های استحصال آب باران با این تغییرات، می‌توان قابلیت اطمینان آن‌ها را حفظ کرد و از تأمین آب پایدار برای آینده اطمینان حاصل نمود (Gwoździej-Mazur et al., 2022; Ray et al., 2022).

بهترین روش‌ها و توصیه‌ها

طراحی و نگهداری سامانه‌های قابل اطمینان استحصال آب باران برای مدیریت پایدار آب بسیار مهم است. بهترین شیوه‌ها در این مورد شامل انجام یک ارزیابی کامل از سایت برای درک الگوهای بارندگی محلی و تقاضای آب است. انتخاب سطوح و مواد مناسب حوزه آبخیز که غیرسمی و بادوام باشند نیز ضروری است. این طرح باید دارای یک سامانه شستشوی اولیه مؤثر برای منحرف کردن آب باران اولیه بوده که ممکن است حاوی آلاینده‌هایی از سطح حوزه آبگیر باشد. مخازن ذخیره‌سازی باید اندازه مناسبی داشته باشند، از آلودگی محافظت شده و از مواد مناسب بر اساس شرایط محلی ساخته شوند. تعمیر و نگهداری منظم، از جمله تمیز کردن ناودان‌ها، سرریزها و صافی‌ها ، برای اطمینان از عملکرد بهینه سامانه حیاتی است (Memarian et al., 2016).

برای تحقیق و توسعه در آینده، نیاز به تمرکز بر بهبود کیفیت آب باران استحصال شده، به‌ویژه در مناطق شهری با سطوح بالای آلودگی جوی وجود دارد. نوآوری در فناوری‌های تصفیه آب می‌تواند نقش به‌سزایی در این زمینه داشته باشد. علاوه‌براین، ادغام سامانه‌های جمع‌آوری آب باران با سایر زیرساخت‌های سبز، مانند بام‌های سبز و روسازی‌های نفوذپذیر، می‌تواند صرفه‌جویی بیش‌تر آب را موجب شود. تحقیق در مورد توسعه سیاست‌ها و مشوق‌های قانونی می‌تواند پذیرش گسترده‌تر سامانه‌های استحصال آب باران را عملی کند. در نهایت، مطالعات

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]
[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

طولانی مدت در مورد اثرات استحصال آب باران بر هیدرولوژی محلی و منابع آب نیز ضروری است تا اطمینان حاصل شود که این سامانه‌ها به‌طور مثبتی به چرخه کلی آب کمک می‌کنند. هدف از این توصیه‌ها، پیشبرد زمینه استحصال آب باران است و آن را به روشی مؤثرتر و گسترده‌تر برای پایداری آب تبدیل می‌کند (Sojka et al., 2016; Siddique, 2021).

نتیجه‌گیری

سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برای نقش حیاتی خود در مدیریت پایدار آب، به‌ویژه در زمینه تغییرات آب‌وهوا و گسترش شهرنشینی شناخته می‌شوند. قابلیت اطمینان این سامانه‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شرایط آب‌وهوایی، طراحی سامانه و چارچوب‌های نظارتی است. سیاست‌های مؤثر برای اجرای موفقیت‌آمیز این سامانه‌ها ضروری است و تضمین می‌کند که با استانداردهای ایمنی مطابقت دارند و به درستی نگهداری می‌شوند. سیاست‌هایی که استانداردهای طراحی را اجرا می‌کنند و تعمیر و نگهداری منظم را تشویق می‌کنند، می‌توانند قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را افزایش دهند. مشوق‌هایی مانند یارانه‌ها نیز نصب این سامانه‌ها و پایبندی به بهترین شیوه‌ها را ترویج می‌کنند. نوآوری‌ها در فناوری باعث بهبود کارآیی و ادغام سامانه‌های استحصال آب باران در مناظر شهری می‌شوند و به آن‌ها اجازه می‌دهند تا چالش‌های ناشی از تغییرات آب‌وهوایی را به طور مؤثری برطرف نمایند. سامانه‌های استحصال آب باران قابل اعتماد به ارزیابی‌های کاملی از سایت برای درک الگوهای بارندگی محلی و تقاضای آب نیاز دارند. انتخاب مواد مناسب و اجرای سیستم‌های انحراف اولین فلاش (اولین خروجی رواناب حاصل از بارش) بسیار مهم است. تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی مستلزم یک رویکرد پویا برای طراحی و مدیریت این سامانه‌هاست که امکان انطباق با عدم قطعیت‌های اقلیمی را نیز فراهم می‌کند. عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران به‌طور قابل‌توجهی با توجه به مکان متفاوت است، که بر نیاز به طراحی‌های زمینه‌ای خاص برای به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان و مقرون‌به‌صرفه بودن تأکید می‌کند. این سامانه‌ها با کاهش وابستگی به منابع شهری و کاهش رواناب حاصل از رگبارهای تندری، نقش مهمی در مدیریت منابع آب، به‌ویژه در مناطقی که با کمبود آب یا سیلاب‌های شدید شهری مواجه هستند، ایفا می‌کنند. نگهداری منظم و بررسی‌های کیفی برای حفظ قابلیت اطمینان سامانه و اطمینان از این‌که آب برداشت شده مطابق با استانداردهای ایمنی باشد، بسیار حیاتی است. با تکامل و توسعه شهرها، ادغام سامانه‌های جمع‌آوری آب باران در برنامه‌ریزی شهری نیز می‌تواند تاب‌آوری در برابر سیل را افزایش دهد و از مدیریت پایدار آب پشتیبانی نماید. تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان از طریق شبیه‌سازی بیلان آب و روش‌های آماری به طراحی سامانه‌های قوی که می‌توانند تغییرات آب‌وهوایی را تحمل کنند، کمک می‌کند. از آن‌جایی‌که کمبود آب به یک موضوع جدی تبدیل شده است، درس‌های آموخته شده از سامانه‌های فعلی استحصال آب باران، ابتکارات آینده را آگاهانه‌تر کرده و منجر به راهبردهای مدیریت آب کارآمدتر و پایدارتر می‌شود. به‌طور خلاصه، طراحی موفق، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران منوط به سیاست‌های مؤثر، پیشرفت‌های فناوری و بهترین شیوه‌های مدیریتی متناسب با شرایط محلی است. مسلماً وجود این سامانه‌ها برای دستیابی به مدیریت پایدار آب و پرداختن به چالش‌های ناشی از تغییرات آب‌وهوایی بسیار ضروری است.

ملاحظات اخلاقی

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

حمایت مالی: این کار در قالب پژوهش آزاد انجام شده و حمایت مالی ندارد.

مشارکت نویسندگان: بخش‌های مختلف مقاله توسط هادی معماریان انجام و نگاشته شده است.

تضاد منافع نویسندگان: نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

سپاس‌گزاری: نویسنده این مقاله، از مجله وزین سامانه های سطوح آبگیر باران ایران و داوران محترم این مقاله صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماید.

منابع

۱. معماریان، هادی. (۱۴۰۱). مدیریت هوشمند سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برمبنای اینترنت اشیاء، *یازدهمین کنفرانس ملی سامانه‌های سطوح آبگیر*، بجنورد. **https://civilica.com/doc/1773183**

۲. معماریان، هادی. (۱۴۰۱). نرم‌افزار طراحی سامانه استحصال آب باران از سطوح پشت‌بام (چارچوب و الزامات)، *یازدهمین کنفرانس ملی سامانه‌های سطوح آبگیر*، بجنورد. **https://civilica.com/doc/۱۷۷۳۱۸٤**

References

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

1. Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3), 195-207. doi:10.1016/j.desal.2008.04.001.
2. Adham, A., Abed, R., & Ritsema, C. (2021). A Reliability Analysis of Rainwater Catchment System. *Water Resources*, 48, 361–367. doi:10.1134/S0097807821030027.
3. Akter, A. (2023). Rainwater harvesting for potable water supply: Opportunities and challenges. In The Handbook of Environmental Chemistry (Vol. 124). *Springer*. doi:10.1007/698_2023_1018.
4. Amos, C. C., Rahman, A., & Gathenya, J. M. (2016). Economic analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A review of the global situation with a special focus on Australia and Kenya. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23), 2097-2167. doi:10.1080/10643389.2010.497422.
5. Appan, A. (2000). A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water*, 1(4), 317-321.
6. Butler, D. (2019). From rainwater harvesting to rainwater management systems. In *New Trends in Urban Drainage Modelling: UDM 2018 11* (pp. 3-9). Springer International Publishing.
7. Chen, Y., Samuelson, H. W., & Tong, Z. (2016). Integrated design workflow and a new tool for urban rainwater management. *Journal of Environmental Management*, 180, 45-51. doi:10.1016/j.jenvman.2016.04.059.
8. Corneliussen, A. (2018). Rainwater harvesting at the University of Arizona: A cost-benefit analysis, Case study and research paper on two buildings on campus. *Retrieved from the University of Arizona repository.*
9. Eyni, S., & Deletic, A. (2023). Urban rainwater utilization: A review of management modes and strategies. *Frontiers in Environmental Science*. doi:10.3389/fenvs.2023.1025665.
10. Fioramonte, B., Campos, M. A. S., de Freitas, S. R., & Basso, R. E. (2022). Rainfall data used for rainwater harvesting systems: a bibliometric and systematic literature review. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 71(7), 816–834. doi:10.2166/aqua.2022.034.
11. Ganthavee, V., & Trzcinski, A. P. (2024). Artificial intelligence and machine learning for the optimization of pharmaceutical wastewater treatment systems: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22, 2293-2318.
12. Gee, K. D., & Sojka, S. (2022). Maximizing the benefits of rainwater harvesting systems: Review and analysis of selected case study examples. In Resilient Water Management Strategies in Urban Settings: Innovations in Decentralized Water Infrastructure Systems (pp. 77-117). *Cham: Springer International Publishing*.
13. Goh, Y. C., & Ideris, M. (2021). Tangki NAHRIM 2.0: an R-based water balance model for rainwater harvesting tank sizing application. *Water Practice and Technology*, 16(1), 182–195.
14. Gonzalez, O., O'Rourke, H. P., Wurpts, I. C., & Grimm, K. J. (2018). Analyzing Monte Carlo simulation studies with classification and regression trees. *Structural Equation Modeling*, 25(3), 403–413.
15. Gwoździej-Mazur, J., Jadwiszczak, P., Kaźmierczak, B., Kózka, K., Struk-Sokołowska, J., Wartalska, K., & Wdowikowski, M. (2022). The impact of climate change on rainwater harvesting in households in Poland. *Applied Water Science*, 12, 15.
16. Hanson, L. S., & Vogel, R. M. (2014). Generalized storage–reliability–yield relationships for rainwater harvesting systems. *Environmental Research Letters*, 9(7), 075007. DOI: 10.1088/1748-9326/9/7/075007.
17. Herrmann, T., & Schmida, U. (1999). Rainwater harvesting and management – policy and regulations in Germany. *Water Science and Technology*, 13(2), 376-381.
18. Hofman-Caris, R., Bertelkamp, C., de Waal, L., van den Brand, T., Hofman, J., van der Aa, R., & van der Hoek, J. P. (2019). Rainwater harvesting for drinking water production: A sustainable and cost-effective solution in The Netherlands. Delft University of Technology. *Retrieved from the TU Delft Research Portal*.
19. Huang, Z., Nya, E. L., Rahman, M. A., Mwamila, T. B., Cao, V., Gwenzi, W., & Noubactep, C. (2021). Integrated Water Resource Management: Rethinking the Contribution of Rainwater Harvesting. *Sustainability*, 13(15), 8338. doi:10.3390/su13158338.
20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*. doi: 10.1017/9781009325844.
21. Islam, M. R. (2023). Factors influencing economic benefit of rainwater harvesting: an empirical analysis. AQUA—Water Infrastructure, *Ecosystems and Society*, 72(1), 32-48.
22. Judeh, T., Shahrour, I., & Comair, F. (2022). Smart rainwater harvesting for sustainable potable water supply in arid and semi-arid areas. *Sustainability*, 14(15), 9271.
23. Khanal, G., Thapa, A., Devkota, N., & Paudel, U. R. (2020). A review on harvesting and harnessing rainwater: an alternative strategy to cope with drinking water scarcity. *Water Supply*, 20(8), 2951–2963. doi: 10.2166/ws.2020.264.
24. Komeh, Z., Memarian, H., & Tajbakhsh, S. M. (2017). Reservoir volume optimization and performance evaluation of rooftop catchment systems in arid regions: A case study of Birjand, Iran. *Water Science and Engineering*, 10(2), 125-133.
25. Martínez-Acosta, L., López-Lambraño, A. A., & López-Ramos, A. (2019). Design criteria for planning the agricultural rainwater harvesting systems: A Review. *Applied Sciences*, 9(24), 5298.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

26. Memarian, H., & Tajbakhsh, S. M. (2023). Role of rainwater harvesting for improving the human well-being and ecosystem services. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 10(4), 13-28.
27. Memarian, H., Hossein Nia, A., Tavasoli, A., Komeh, Z., Tajbakhsh, S. M., Abbasi, A. A., & Parsayi, L. (2016). Health and environmental considerations of rooftop catchment systems (Case study: Aq Ghala, Golestan Province, Iran). *Water Harvesting Research*, 1(1), 1-11.
28. Memarian, H., Komeh, Z., Tavasoli, A., Tajbakhsh, S., Abbasi, A. A., & Parsayi, L. (2017). Socio-economic considerations of rooftop catchment systems (Case study: Golestan Province, Iran). *Water Harvesting Research*, 2(1), 1-12.
29. Memarian, H., Tavasoli, A., Tajbakhsh, M., Komeh, Z., Abbasi, A. K., & Parsayi, L. (2015). Technical report: A guideline for designing and optimizing rainwater reservoirs in buildings (Case study: Golestan Province, Iran). Iran. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 5(4), 55-68.
30. Memarian, Hadi (2022). Intelligent management of rainwater harvesting systems based on the internet of things, *The 11th National Conference on Catchment Surface Systems،Bojnord*،https://civilica.com/doc/1773183 [In Persian]
31. Memarian, Hadi (2022). Software for designing rainwater harvesting systems from roof surfaces (framework and requirements), *The 11th National Conference on Catchment Surface Systems،Bojnord*, https://civilica.com/doc/1773184 [In Persian]
32. Morales-Figueroa, C., Castillo-Suárez, L. A., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., & Teutli-Sequeira, E. A. (2023). Treatment processes and analysis of rainwater quality for human use and consumption. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 9369–9392.
33. Müller, T. M., Leise, P., Lorenz, I.-S., Altherr, L. C., & Pelz, P. F. (2021). Optimization and validation of pumping system design and operation for water supply in high-rise buildings. *Optimization and Engineering*, 22, 643–686.
34. Murillo-Alvarado, P. E., & Cárdenas Gil, M. A. (2022). Rainwater harvesting systems that reduce water consumption with optimal locations of solar concentration power plants. *Frontiers in Energy Research*, 10.
35. Nyahora, P. P., Babel, M. S., Ferras, D., & Emen, A. (2020). Multi-objective optimization for improving equity and reliability in intermittent water supply systems. *Water Supply*, 20(5), 1592–1603.
36. Ortiz, N., & Rao, S. (2024). Review of Rain and Atmospheric Water Harvesting History and Technology. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. doi:10.1093/acrefore/9780199389414.013.613.
37. Ostfeld, A. (2012). Optimal reliable design and operation of water distribution systems through decomposition. *Water Resources Research*.
38. Pacey, A., & Cullis, A. (1986). Rainwater Harvesting. London: Intermediate Technology Publications.
39. Pari, L., Cozzolino, L., & Bergonzoli, S. (2023). Rainwater: Harvesting and Storage through a Flexible Storage System to Enhance Agricultural Resilience. *Agriculture,* 13(12), 2289. doi:10.3390/agriculture13122289.
40. Paxton, P., Curran, P. J., Bollen, K. A., Kirby, J., & Chen, F. (2001). Monte Carlo experiments: Design and implementation. *Structural Equation Modeling*, 8(2), 287–312.
41. Preeti, P., & Rahman, A. (2021). A Case Study on Reliability, Water demand and economic analysis of rainwater harvesting in Australian capital cities. *Water*, 13(19), 2606.
42. Preeti, P., & Rahman, A. (2021). A case study on reliability, water demand and economic analysis of rainwater harvesting in Australian capital cities. *Water*, 13(19), 2606.
43. Qi, Q., Marwa, J., Mwamila, T. B., Gwenzi, W., & Noubactep, C. (2019). Making rainwater harvesting a key solution for water management: The Universality of the Kilimanjaro Concept. *Sustainability*, 11(20), 5606. doi:10.3390/su11205606.
44. Rahman, A. (2017). Recent advances in modelling and implementation of rainwater harvesting systems towards sustainable development. *Water*, 9(12), 959. doi:10.3390/w9120959.
45. Rahman, A. (2017). Recent Advances in Modelling and Implementation of Rainwater Harvesting Systems towards Sustainable Development. *Water*, 9(12), 945.
46. Rahman, A., Yildirim, G., Alim, M. A., Amos, C. C., Khan, M. M., & Shirin, S. (2023). Rainwater harvesting systems to promote sustainable water management. *AIP Conference Proceedings*, 2643(1), 020001.
47. Raimondi, A., Quinn, R., Abhijith, G. R., Becciu, G., & Ostfeld, A. (2023). Rainwater harvesting and treatment: State of the art and perspectives. *Water*, 15(8), 1518.
48. Raimondi, A., Quinn, R., Gnecco, I., & Ostfeld, A. (2024). New advances in rainwater harvesting and treatment. *Water*, 16(11), 1591. doi:10.3390/w16111591.
49. Ray, R. L., Sishodia, R. P., & Olutimehin, T. (2022). Rainwater harvesting for sustainable water resource management under climate change. In Q. Tang & G. Leng (Eds.), Climate Risk and Sustainable Water Management (pp. 374-400). *Cambridge University Press*. doi:10.1017/9781108787291.021.
50. Razali, M. H. H., Puteh, A. Q., Sulaiman, A. H., & Yatim, M. H. M. (2023). Smart rainwater harvesting system for sustainable agricultural irrigation and drainage system. In M. Sultan (Ed.), Irrigation and Drainage - Recent Advances (pp. 1-20). IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.104442.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]

51. Rodrigues, A. M., Formiga, K. T. M., & Milograna, J. (2023). Integrated systems for rainwater harvesting and greywater reuse: a systematic review of urban water management strategies. *Water Supply*, 23(10), 4112–4125. doi:10.2166/ws.2023.240.
52. Ross, T. T., Alim, M. A., & Rahman, A. (2022). Community-scale rural drinking water supply systems based on harvested rainwater: A case study of Australia and Vietnam. *Water*, 14(11), 1763.
53. Shiguang, C., & Yu, Z. (2021). Water saving potential and economic viability assessment of rainwater harvesting system for four different climatic regions in China. *Water Supply*, 21(1), 386–400.
54. Shin, S., Lee, S., Judi, D. R., Parvania, M., Goharian, E., McPherson, T., & Burian, S. J. (2018). A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems. *Water*, 10(2), 164.
55. Shokati, H., Kouchakzadeh, M., & Haghighi Fashi, F. (2020). Assessing reliability of rainwater harvesting systems for meeting water demands in different climatic zones of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 109-114.
56. Siddique, I. (2021). Sustainable water management in urban areas: Integrating innovative technologies and practices to address water scarcity and pollution. *The Pharmaceutical and Chemical Journal*, 8(1), 172-178.
57. Silva, L. P., & de Souza, F. T. (2019). Rainwater Management, Sustainable Urban Growth, and Climate Change. In Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. *Springer*. doi:10.1007/978-3-319-71061-7_39-1.
58. Silva, M. P. D., González, J., da Costa, B. B., Garrido, C., Soares, C. A., & Haddad, A. N. (2023). Environmental impacts of rainwater harvesting systems in urban areas applying life cycle assessment- LCA. *Engineering*, 4(2), 1127-1143.
59. Słyś, D., & Stec, A. (2020). Centralized or decentralized rainwater harvesting systems: A case study. *Resources*, 9(1), 5.
60. Sojka, S., Younos, T., & Crawford, D. (2016). Modern urban rainwater harvesting systems: design, case studies, and impacts. *Sustainable Water Management in Urban Environments*, 209-234.
61. Teston, A., Scolaro, T. P., Maykot, J. K., & Ghisi, E. (2022). Comprehensive Environmental Assessment of Rainwater Harvesting Systems: A Literature Review. *Water*, 14(17), 2716.
62. Thomas, A., & Lüthi, C. (2013). Rainwater harvesting and management – policy and regulations in Germany. *Water Science and Technology*, 13(2), 376. doi:10.2166/ws.2013.030.
63. Toosi, A. S., Danesh, S., Tousi, E. G., & Doulabian, S. (2020). Annual and seasonal reliability of urban rainwater harvesting system under climate change. *Sustainable Cities and Society*, 63.
64. United States. (2011). Environmental Protection Agency. Region IX., United States. Army. Corps of Engineers. South Pacific Division, Resources Legacy Fund, Camp, & Dresser & McKee. Climate change handbook for regional water planning. *California Department of Water Resources.*
65. VS, J., & Jacob, R. S. (2023). Traditional Rainwater Harvesting Systems in the World. In Traditional Rainwater Harvesting Structures (pp. 15-33). Cham: Springer Nature Switzerland.
66. Wartalska, K., Grzegorzek, M., Bełcik, M., Wdowikowski, M., Kolanek, A., Niemierka, E., Jadwiszczak, P., & Kaźmierczak, B. (2024). The potential of rainwater harvesting systems in Europe – current state of art and future perspectives. *Water Resources Management*, 38, 4657–4683.
67. Xu, J., Dai, J., Wu, X., Wu, S., Zhang, Y., Wang, F., ... & Tan, Y. (2023). Urban rainwater utilization: A review of management modes and harvesting systems. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1025665.
68. Xu, W. D., Fletcher, T. D., Duncan, H. P., Bergmann, D. J., Breman, J., & Burns, M. J. (2018). Improving the multi-objective performance of rainwater harvesting systems using real-time control technology. *Water*, 10(2), 147.
69. Yildirim, G., Alim, M. A., & Rahman, A. (2022). Review of rainwater harvesting research by a bibliometric analysis. *Water*, 14(20), 3200. doi:10.3390/w14203200.

[Downloaded from mail.jircsa.ir on 2026-09-27]

[DOR: 20.1001.1.24235970.1403.12.4.9.8]