مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱
صفحه‌های ۶۷۳-۶۵۹
DOI: 10.22059/jwim.2022.340638.979

مقاله پژوهشی:

ارزیابی کمی و کیفی آب باران استحصال‌شده از پشت‌بام برای مصارف شرب

محمدعلی غلامی سفیدکوهی[1*]، زهرا باقری خلیلی[2]
دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

چکیده
استحصال آب باران پشت‌بام به‌عنوان منبع جایگزین مهم در مکان و زمانی که منابع آب سطحی و زیرزمینی آلوده، محدود و یا به‌سادگی در دسترس نیستند، به‌شمار می‌رود. این پژوهش با هدف بررسی کمی و کیفی آب استحصال‌شده از سامانه‌های برداشت آب باران برای تولید آب شرب در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری صورت گرفته است. برای بررسی پتانسیل استحصال آب باران در محدوده دانشگاه، یکی از ساختمان‌های خوابگاه دانشجویی با مساحت سقف ۸۵۰ مترمربع و ظرفیت ۳۰۰ دانشجو در نظر گرفته شد. از داده‌های روزانه بارندگی ایستگاه دشت‌ناز ساری از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۷ (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸) به‌عنوان ورودی‌های مدل بیلان روزانه آب به‌منظور تعیین حجم مناسب مخزن ذخیره آب باران استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی کیفیت آب جمع‌آوری‌شده از سقف، از خروجی بام نمونه‌برداری و برخی از پارامترهای مهم فیزیکی، شیمیایی و میکروبی اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج، حجم مخزن ذخیره‌سازی با ظرفیت ۳۰ مترمکعب و با قابلیت اطمینان حجمی و زمانی به‌ترتیب ۲۹ و ۲۹/۵ درصد، انتخاب شد. یافته‌ها نشان داد در نتیجه اجرای این سامانه، سالانه حدود ۳۰۹ مترمکعب در مصرف آب شهری صرفه‌جویی خواهد شد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد استفاده مستقیم از آب جمع‌آوری‌شده برای مصارف شرب دارای محدودیت می‌باشد. بر این اساس با توجه به میزان آب تولیدی سالانه پیشنهاد می‌شود تا ضمن استفاده از تانک شن برای بهبود پارامترهای فیزیکی (کدورت)، از سامانه UV برای گندزدایی و تصفیه میکروبی استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: سامانه جمع‌آوری باران، صرفه‌جویی آب، قابلیت اطمینان، مدل بیلان آب، IRWQI.

Quantity and quality assessment of rainwater extracted from the roof for drinking water

Mohammad Ali Gholami Sefidkouhi[1*], Zahra Bagheri Khalili[2]
1. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2. Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
Received: March 16, 2022 Accepted: August 21, 2022

Abstract
Roof rainwater harvesting is considered an important alternative source where contaminated surface and groundwater resources are limited or not readily available. The aim of this study was to evaluate the quantity and quality of water extracted from rainwater harvesting systems for drinking water production at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. To investigate the potential for rainwater harvesting within the university, one of the student dormitory buildings with a roof area of 850 m^2 and a capacity of 300 students was considered. Daily rainfall data of Dasht-e Naz station in Sari in the period 2000 to 2018 were used as inputs of the water balance model to determine the appropriate volume of the rainwater storage tank. Also, in order to evaluate the quality of water collected from the roof, sampling from the roof outlet and some important physical, chemical and microbial parameters were measured. According to the results, the volume of the storage tank of 30 m^3 in the dormitory with Volumetric and time reliability of 29 and 29.5 percent, respectively, was considered appropriate. The results showed that at the implementation of this system, about 309 m^3 of town water consumption will be saved annually. The results also show that the direct use of collected water for drinking purposes is limited. Accordingly, according to the amount of water produced annually, it is recommended to use a UV system for disinfection and microbial purification while using a sand tank to improve physical parameters (turbidity).

Keywords: IRWQI, Rainwater Harvesting System, Reliability, Water Saving, Water Balance Model.

* نویسنده مسئول
Email: ma.gholami@sanru.ac.ir

مقدمه

با توجه به رشد جمعیت و در نتیجه آن افزایش تقاضای آب و هم‌چنین تغییرات آب‌وهوایی، منابع قابل دسترس آب آشامیدنی در سطح جهان کاهش یافته است (IPCC, 2014). کشور ایران به‌دلیل کم‌بودن میزان ریزش‌ها و نامناسب‌بودن پراکنش زمانی و مکانی، در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد. با این‌حال، حتی در مناطقی مانند شمال ایران، که به‌نظر می‌رسد منابع آب کافی وجود دارد، نیازمند ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا از طریق استفاده از فناوری‌های جدید در برابر تغییرات آب‌وهوایی می‌باشد (WHO, 2011). علاوه بر محدودیت کمی منابع آب، هزینه‌های استحصال آب و محدودیت منابع مالی نیز طرح‌های توسعه منابع آب جدید را با مشکل و محدودیت مواجه کرده است (Gholamhossien pour jafari nejad *et al*., 2013). از این‌رو، یکی از روش‌هایی که به‌طور مستقیم باعث کاهش اتکا به منابع آب معمول می‌شود، جمع‌آوری آب باران است.

وقتی‌که منابع آب سطحی و زیرزمینی آلوده، محدود و یا به‌سادگی در دسترس نباشد، آب برداشت‌شده از پشت‌بام به‌عنوان منبع جایگزین مهم برای مصارف شرب و غیرشرب به‌شمار می‌رود (Kirs *et al*., 2017). سامانه برداشت آب باران (RWH)[1]، به جمع‌آوری رواناب سطحی از یک سطح (بام، محوطه اطراف خانه و سطوح آزاد زمین) و استفاده مفید از آن برمی‌گردد. مزایای استفاده از سامانه‌های برداشت آب باران، کاهش رواناب شهری در بارش‌های شدید، کاهش استفاده از آب قابل‌شرب و کاهش هزینه‌های زیرساخت مرتبط با سامانه‌های آب آشامیدنی می‌باشد (Lye, 2009; Steffen *et al*., 2013; Tavakol-Davani *et al*. 2016). هم‌چنین می‌توان از سامانه‌های برداشت آب باران به‌منظور تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و بهبود چرخه آب‌شناسی‌محلی استفاده کرد (Nachshon *et al*., 2016). علاوه براین، بسیاری از جوامع روستایی در کشورهای در حال توسعه و پیشرفته از آب حاصل از سامانه‌های برداشت آب باران به‌عنوان منبع اصلی آب برای شرب استفاده می‌کنند (Meera & Mansoor Ahammed, 2018).

تعیین اندازه بهینه مخزن ذخیره، یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی سامانه‌های برداشت آب باران می‌باشد، زیرا اطمینان از تأمین آب برای مصارف را تضمین می‌نماید. اگر مخزن با ظرفیت زیاد انتخاب شود، نتیجه آن هدردادن انرژی و هزینه خواهد بود. در مقابل در صورت انتخاب مخزن با حجم کم‌تر از حجم بهینه، تأمین آب موردنیاز امکان‌پذیر نخواهد بود (Haque *et al*., 2016). پژوهش‌گران زیادی رابطه بین اندازه مخزن آب باران و صرفه‌جویی در آب را بررسی کردند (Alim *et al*., 2020; Imteaz *et al*., 2012; Imteaz *et al*., 2011; Karim *et al*., 2015; Khastagir & Jayasuriya, 2010; Kolavani & Kolavani, 2020). برای این منظور، مدل بیلان روزانه آب (WBM)[2] توسعه یافت. در پژوهشی، از WBM به‌طور گسترده برای تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان مخازن آب باران در سامانه‌های RWH برای شهر ملبورن استرالیا استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد، افزایش تقاضا سبب کاهش قابلیت اطمینان سامانه‌های جمع‌آوری آب باران می‌شود، به‌طوری‌که حتی با مساحت سقف و اندازه مخزن بزرگ‌تر قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصد برای تقاضای خانواده چهار نفره حاصل نشد (Imteaz *et al*., 2011). هم‌چنین، امکان-سنجی فنی اجرای سامانه برداشت آب باران (RWH) در هفت شهر واقع در شمال ایران نشان داد که امکان‌سنجی اجرای سامانه‌های RWH براساس پتانسیل صرفه‌جویی در آب آشامیدنی یک بررسی مکان‌محور می‌باشد، زیرا به‌شدت به تقاضای آب آشامیدنی بستگی دارد (Kolavani & Kolavani, 2020).

علاوه بر تعیین اندازه بهینه مخزن ذخیره در طراحی سامانه RWH، تصمیم‌گیری در مورد کاربرد آب جمع‌آوری‌شده برای مصارف مختلف به‌طور مثال آشامیدن، کشاورزی و یا صنعت مهم است، زیرا کیفیت آب در چنین تصمیم‌گیری نقش اساسی ایفا می‌کند (Rahman *et al*., 2014; Zhu *et al*., 2004). در پژوهش Ranaee *et al*. (2021) کیفیت آب جمع‌آوری‌شده در سامانه‌های RWH در منطقه نیمه‌خشک ایران را برای مصارف مختلف بررسی شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد، آب برداشت‌شده از این سامانه‌ها برای مصارف کشاورزی مناسب است اما برای استفاده شرب انسان‌ها و دام‌ها نیازمند تصفیه است. از سوی دیگر، تأمین آب سالم برای بقای انسان‌ها بسیار مهم است. در این بین، آلودگی منابع آب آشامیدنی از لحاظ بهداشتی از اهمیت خاصی برخوردار است و لزوم توجه جدی را می‌طلبد. به‌طورکلی، آب آشامیدنی سالم نباید حاوی غلظت‌های بیش از حد مجاز مواد شیمیایی خطرناک و میکروبی باشد و هم‌چنین از لحاظ فیزیکی نیز برای مصرف‌کننده قابل‌پذیرش باشد (Mokhtari *et al*., 2011). به‌طور مثال، یکی از منابع آلاینده آب استحصال‌شده باران فلزات سنگین است (Al-Khatib *et al*., 2019) که می‌تواند ناشی از پوشش فلزی سقف منازل، رنگ‌آمیزی سقف‌ها و آلودگی هوا باشد (Zafarzadeh, 2006). به‌طورکلی، کیفیت آب برداشت‌شده در سامانه‌های جمع‌آوری آب باران از عواملی هم‌چون، مشخصات بارندگی، آلودگی هوا، ویژگی‌های مواد تشکیل‌دهنده سقف یا حوضه آبریز، موقعیت جغرافیایی و تعداد روزهای خشک قبل از رویداد بارندگی متأثر است (Meera & Mansoor Ahammed, 2018).

آلودگی احتمالی آب جمع‌آوری‌شده با آلاینده‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی در فرایند جمع‌آوری و ذخیره‌سازی در سامانه‌های برداشت آب باران نگرانی جدی است که ممکن است موفقیت این سامانه را تهدید کند (Ranaee *et al*., 2021). نتایج مطالعه امکان‌سنجی سامانه‌های RWH برای تولید آب آشامیدنی در هلند با درنظرگرفتن سامانه تصفیه پیشرفته و مؤثر، دلالت بر مقرون‌به‌صرفه‌نبودن این پروژه در مناطق روستایی دارد (Hofman-Caris *et al*., 2019). در حالی‌که، در پژوهشی دیگر با توجه به کیفیت آب باران جمع‌آوری‌شده و با نصب سامانه فیلتراسیون ساده برای تولید آب آشامیدنی، سامانه RWH از لحاظ اقتصادی در یاتا واقع در فلسطین اشغالی امکان‌پذیر شد (Al-Batsh *et al*., 2019). به‌صورت عمومی، در امکان‌سنجی سامانه‌های RWH، روش تصفیه و ظرفیت تصفیه در انتخاب یا رد سامانه مؤثر است. روش‌های تصفیه موردنیاز، با توجه به کیفیت آب جمع‌آوری‌شده مشخص می‌شود درحالی‌که ظرفیت یا نرخ تصفیه به‌طور مستقیم با تقاضا یا نیاز جامعه مرتبط است.

هرچند مطالعات با ارزشی در زمینه جمع‌آوری آب از سطوح غیرقابل نفوذ شهری و پشت‌بام‌ها در داخل کشور انجام شده است (Pahlevani, 2017; Sadoddin *et al*., 2012; Taran & Mahtabi, 2016)، اما در زمینه پتانسیل‌های برداشت آب باران و بررسی کاربرد، قابلیت اطمینان و کارایی سامانه برداشت آب باران در شهر ساری پژوهشی انجام نشده است. بنابراین باتوجه به این‌که ابعاد و زوایای مختلف این مبحث نیازمند پژوهش‌های گسترده تکمیلی و مکان‌محور می‌باشد، این پژوهش با تعیین حجم مناسب مخزن ذخیره‌سازی آب باران به ارزیابی کمی و کیفی آب استحصال‌شده از سامانه‌های برداشت آب باران می‌پردازد و روش‌های مناسب تصفیه آب باران جمع‌آوری‌شده را برای مصارف شرب در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بررسی می‌کند. نتایج این

پروژه باعث افزایش توجه سیاست‌گذاران و مدیران منابع آبی شهری نسبت به راه‌حل‌ها و دانش منطبق بر محیط زیست در راستای معرفی و استفاده از منابع آبی مختلف را فراهم خواهد نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در شمال ایران و در محدوده دشت تجن، به‌عنوان پایلوت انتخاب شد. این منطقه براساس شاخص دومارتن، در اقلیم مرطوب طبقه‌بندی می‌شود (Bakhtfirouz, 2011). از داده‌های روزانه بارندگی ایستگاه دشت‌ناز از سال ۱۳۷۸ تا ۱۳۹۷ (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸) به‌منظور برآورد رواناب استفاده شد. برای بررسی پتانسیل استحصال آب باران در محدوده دانشگاه، سامانه برداشت آب باران در یکی از ساختمان‌های خوابگاه دانشجویی با مساحت سقف ۸۵۰ مترمربع در نظر گرفته شد. در شکل (۱) موقعیت مکانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و ساختمان خوابگاه دانشجویان ارائه شد. این ساختمان ظرفیت گنجایش اسکان ۳۰۰ دانشجو را دارد. به‌منظور افزایش عملکرد سامانه RWH، مخزن با حجم مناسب برای ذخیره‌سازی آب باران در نظر گرفته شد. بدین منظور و برای تعیین مناسب‌ترین حجم مخزن ذخیره، کارایی سامانه‌های جمع‌آوری آب باران برای مخازن پنج، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ مترمکعب بررسی شد.

Figure 1. Location of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University and student dormitory building

مدل بیلان آب

به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین حجم مخزن ذخیره که از توجیه فنی برخوردار باشد، از مدل روزانه بیلان آب با رویکرد تولید پس از سرریز (YAS)[۳] که توسط Jenkins & Pearson (1978) توسعه یافته، استفاده شد. در این مدل، در یک بازه مشخص مخزن به‌عنوان حجم کنترل بوده که رواناب سقف به‌عنوان ورودی و آب تصفیه‌شده، تلفات و سرریز به‌عنوان خروجی محسوب می‌شود. با فرض استفاده بر خط از آب تصفیه‌شده، تقاضای روزانه آب شرب به‌عنوان عامل محدودکننده در مدل بیلان در نظر گرفته شد. رابطه (۱) مدل بیلان روزانه آب را بیان می‌دارد.

$$SLAT_i = R_i + SLAT_{i-1} - SP_i - RWS_i \qquad (۱)$$

که در آن، $SLAT_i$، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن در روز iام (مترمکعب)، $SLAT_{i-1}$، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن در روز i-1ام (مترمکعب)، R_i، حجم رواناب خالص ورودی به مخزن در روز iام (مترمکعب)، SP_i، حجم سرریزشده از مخزن در روز iام (مترمکعب)، RWS_i، حجم آب باران مصرف‌شده در روز iام (مترمکعب) است. مقدار R_i با استفاده از رابطه (۲) تخمین زده شد.

$$R_i = CA \times \left((P_i \times SR) - FF\right) \qquad (۲)$$

که در آن، P_i، ارتفاع بارندگی در روز iام (متر)، SR، مساحت سقف (مترمربع)، CA، ضریب رواناب، FF، حجم رواناب اولیه در هر بارش برای شست‌وشوی سقف (مترمکعب). اولین جریان حاصل از بارندگی بر روی سقف، می‌تواند بسیاری از آلاینده‌ها را از آن شست‌وشو دهد (Lye, 2009). به‌استناد بررسی‌های انجام‌شده، رواناب حاصل از یک میلی‌متر بارندگی اولیه برای شست‌وشوی اولیه کافی است. علاوه بر این، قسمتی از رواناب کل به‌دلیل تبخیر، نشت و انحراف از مسیر جمع‌آوری آب باران، تلف خواهد شد. به استناد Alim *et al.* (2020) ضریب رواناب ۰/۸۵ فرض شد. رابطه (۳) رویکرد YAS در مدل بیلان روزانه را بیان می‌کند.

$$\begin{aligned} RWS_i &= \min\begin{cases} D_i \\ SLAT_{i-1} \end{cases} \\ SLAT_i &= \min\begin{cases} SLAT_{i-1} + R_i - RWS_i \\ V - RWS_i \end{cases} \end{aligned} \qquad (۳)$$

که در آن، Di، تقاضای روزانه آب شرب خوابگاه و V حجم مخزن (مترمکعب) است. با شروع سال تحصیلی در ماه مهر جمعیت ساکنین خوابگاه به ۳۰۰ نفر (۱۰۰ درصد ظرفیت) می‌رسد و با اتمام سال تحصیلی در ماه خرداد، جمعیت دانشجویان ساکن ۸۰ درصد کاهش می‌یابد. بر این اساس و با درنظرگرفتن ۱۵ لیتر نیاز روزانه شرب برای هر نفر (Alim *et al.*, 2020)، تقاضای روزانه شرب خوابگاه ٤/٥ و ۰/۹ مترمکعب به‌ترتیب برای ۱۰۰ و ۲۰ درصد ساکن برآورد شده است. بر این اساس تقاضای سالانه آب شرب در خوابگاه ۱۳۰۹ مترمکعب تخمین زده می‌شود.

به‌منظور ارزیابی مخازن ذخیره‌سازی مختلف در سامانه RWH از قابلیت اطمینان حجمی (R_v)[٤] و زمانی (R_t)[٥] سامانه برداشت آب باران به‌ترتیب از روابط (٤) و (٥) استفاده شد. قابلیت اطمینان حجمی بیانگر پتانسیل سالانه صرفه‌جویی آب شرب خوابگاه است درحالی‌که قابلیت اطمینان زمانی، تعداد روزهایی که برای تأمین تقاضای آب شرب به شبکه آب شهری نیاز نباشد، را نشان می‌دهد.

$$R_v(\%) = \frac{\sum_1^{365} RWS_i}{\sum_1^{365} D_i} \times 100 \qquad (٤)$$

$$R_t(\%) = \frac{\sum_1^{365} count(MWS_i = 0)}{\sum_1^{365} count(MWS_i \geq 0)} \times 100 \qquad (٥)$$

که در آن، MWS_i حجم آب شهری مصرف‌شده در روز iام می‌باشد.

برای تعیین حجم مخزن بهینه از روش Ghisi *et al.* (2007) استفاده شد. در پژوهش ایشان، ظرفیت بهینه مخزن ظرفیتی است که با افزایش حجم به میزان یک

مترمکعب، پتانسیل ذخیره‌سازی سالانه کم‌تر از ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد. در پژوهش حاضر به‌دلیل کمبود بارش در فصل بهار طی سال‌های اخیر در منطقه، پتانسیل ذخیره‌سازی ۰/۳ درصد ناشی از افزایش ۱ مترمکعب لحاظ شد.

بررسی کیفی رواناب

به‌منظور بررسی کیفیت آب جمع‌آوری‌شده از سقف، از خروجی بام یکی از ساختمان‌ها دانشگاه از جنس ایرانیت نمونه‌برداری شد. پارامترهای کیفی موردبررسی شامل پارامترهای فیزیکی (کدورت، هدایت الکتریکی (EC) و pH)، شیمیایی (تقاضای اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، تقاضای اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD_5)، نیترات، فسفات، سدیم، منیزیم، کلسیم، کلر، آهن، بی‌کربنات، منگنز، روی، مس، کادمیوم و سرب) و میکروبی (تعداد کل باکتری و تعداد باکتری‌های مدفوعی) بود. تاریخ نمونه‌برداری و نوع پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در جدول (۱) ارائه شد. به‌منظور اندازه‌گیری پارامترها، نمونه به آزمایشگاه معین استان مازندران ارسال شد.

Table 1. Date and type of sampled parameters

Sampling date	Type of parameters measured
2020/10/07	Physical and chemical parameters
2020/11/08	Physical and chemical parameters- Microbial parameters
2021/02/22	Physical and chemical parameters
2021/05/02	Physical and chemical parameters- Microbial parameters
2021/05/08	Microbial parameters

ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی معمولاً شامل نظارت بر مقادیر پارامترهای شیمیایی، فیزیکی، میکروبی و آلاینده‌های بیولوژیکی مطابق استانداردها است (Kingsborough *et al*., 2016). سازمان بهداشت جهانی (WHO)[6] برخی از دستورالعمل‌ها را برای ارزیابی کیفیت آب پیشنهاد کرده است (WHO, 2004, 2011). کشورهای مختلف با توجه به شرایط زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی می‌توانند از این استانداردها به‌عنوان مبنا برای توسعه استانداردها و مقررات مناسب کیفیت آب استفاده کنند (Ranaee *et al*., 2021). بنابراین استانداردهای ملی کیفیت آب، ممکن است از کشوری به کشور دیگر متفاوت باشد. بر این اساس، برای بررسی کیفیت آب باران جمع‌آوری‌شده از مقررات و استانداردهای ملی (Iran Department of Environment 2016; Iran Deputy for Strategic Supervision, 2010) و بین‌المللی (WHO, 2004) استفاده شد.

برای کمی‌سازی کیفیت آب جمع‌آوری‌شده از پشت‌بام در منطقه، از شاخص ملی کیفیت آب (IRWQI) استفاده شد (رابطه (٦)). شاخص‌های کیفیت آب (WQI) ابزارهای ساده و کارآمدی برای تفسیر آلودگی با توجه به عناصر مختلف آلاینده برای منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی هستند. این شاخص‌ها معمولاً فرمول‌های تجربی هستند که در آن، پارامترهای کیفیت آب با وزن‌های مشخص (بر اساس اهمیت آن‌ها) ادغام می‌شوند و منابع آبی را در محدوده خیلی‌ضعیف تا خیلی‌خوب برای مصارف مختلف (شرب، کشاورزی و یا صنعت) طبقه‌بندی می‌کنند (Iran Department of Environment, 2012; Ranaee *et al*., 2021). شاخص IRWQI برای ارزیابی کیفیت آب براساس پارامترهای معمولی و سمی برای منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط سازمان محیط زیست ایران تهیه شد (Iran Department Of Environment, 2012). این شاخص‌ها از شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت ایالات متحده، NSFWQI، اقتباس شده است (Brown *et al*., 1970).

$$IRWQI = \prod_{i=1}^{M}(I_i^{W_i})^{\frac{1}{a}} \quad , \; a = \sum_{i=1}^{M} W_i \qquad (٦)$$

که در آن، M تعداد پارامترهای کیفی آب، I_i مقدار شاخص برای پارامتر iام از منحنی رتبه‌بندی، W_i وزن پارامتر iام می‌باشد. شاخص IRWQI را می‌توان به‌طور

جداگانه برای خصوصیات کیفیت آب معمولی ($IRWQI_{SC}$)[۷] یا سمی ($IRWQI_{TC}$)[۸] ارزیابی کرد. با توجه به محدوده مطالعه حاضر، $IRWQI_{SC}$ و $IRWQI_{TC}$ برای نمونه‌های آب باران جمع‌آوری‌شده از پشت‌بام برای مجموعه‌ای از پارامترهای کیفیت آب ذکرشده در جدول (۲) و (۳) ارزیابی شد.

Table 2. Measured parameters and weight factor in IRWQI index (Iran Department of Environment, 2012)

Group	Parameter	Weight
Conventional Pollutants	pH	0.051
	EC ($\mu s.cm^{-1}$)	0.96
	BOD5 ($mg.l^{-1}$)	0.117
	COD ($mg.l^{-1}$)	0.093
	Turbidity (NTU)	0.062
	Nitrate ($mg.l^{-1}$)	0.108
	Phosphate ($mg.l^{-1}$)	0.087
	Fecal Coliform (#/100 mL)	0.14
Toxic Pollutants	Lead (ppb)	0.092
	Cadmium (ppb)	0.092
	Iron (ppb)	0.063
	Manganese (ppb)	0.056

Table 3. Descriptive equivalent of index values in IRWQI (Iran Department of Environment, 2012)

Index value	0-15	15-30	30-45	45-55	55-70	70-85	85-100
Descriptive equivalent	Unfitted	Poor	Almost poor	Moderate	Almost good	good	Excellent

نتایج و بحث

بارش

همان‌طورکه در شکل (۲) مشاهده می‌شود دوره خشک از آوریل شروع می‌شود و در سپتامبر به پایان می‌رسد. میزان بارش ممکن است در ماه نوامبر تا حدود ۱۰۰ میلی‌متر افزایش یابد و در جولای به حدود ۱۹/۵ میلی‌متر برسد. توزیع باران طبق انتظار در تمام ماه‌ها یکنواخت نیست. حداکثر تعداد روزهای بارانی ۱۲ روز است که در ماه‌های مارس اتفاق افتاد. در حالی‌که، حداقل فراوانی روزهای بارانی، پنج روز، در ماه ژوئن رخ داد. میانگین ماهانه بارش در منطقه طی دوره ۱۹ ساله (۱۳۷۸–۱۳۹۷)، حدود ۵۳/٤ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین بارندگی در طی دوره مرطوب (اکتبر تا مارس) حدود ٤۵۲ میلی‌متر و دوره خشک حدود ۱۸۸ میلی‌متر می‌باشد.

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان حجمی و زمانی برای احجام مختلف مخزن ذخیره برای سامانه RWH با مساحت سقف ۸۵۰ مترمربع در شکل (۳) ارائه شده است.

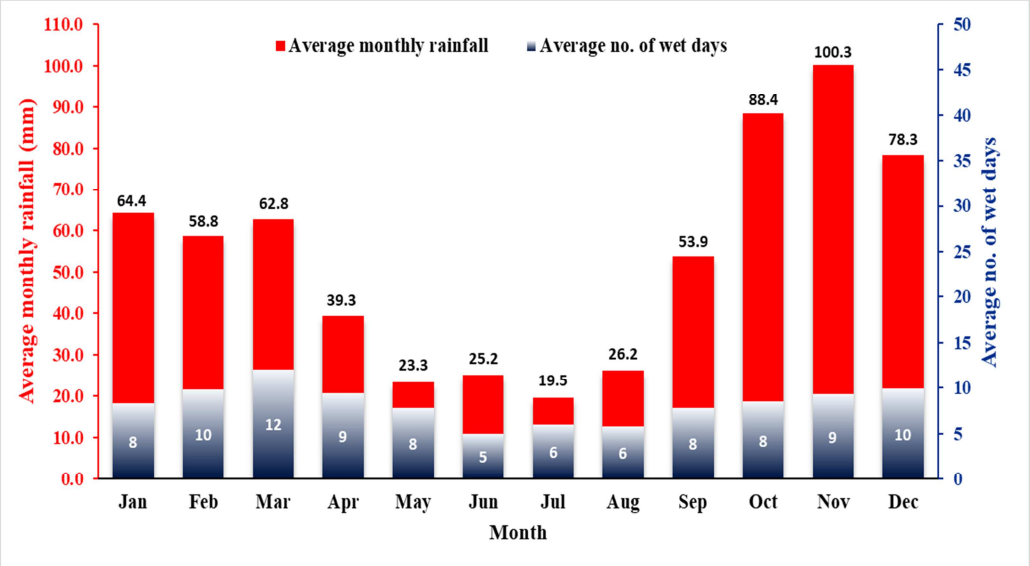

Figure 2. Average monthly rainfall distribution in the period 2000-2018

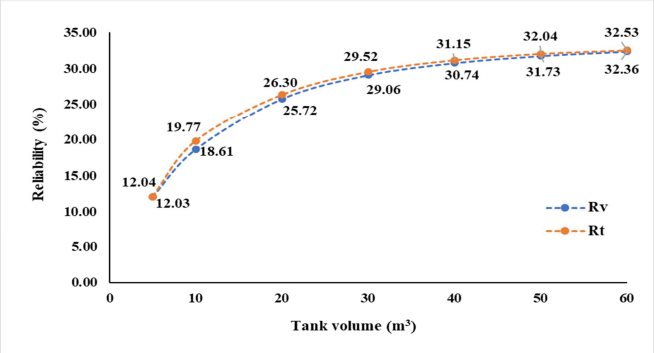

Figure 3. Time (R_t) and volumetric (R_v) reliability curves against storage tank volume

یافته‌ها نشان می‌دهد، برای سامانه RWH با مساحت سقف ۸۵۰ مترمربع و نیاز شرب متغیر طی ماه‌های مختلف سال، مقدار قابلیت اطمینان زمانی و حجمی تفاوتی با هم ندارد، به‌طوری‌که، برای مخازن ذخیره پنج تا ٦٠ مترمکعب، قابلیت اطمینان زمانی از ١٢/٠٤ تا ٣٢/٥٣ درصد متغیر است. درحالی‌که قابلیت اطمینان حجمی ١٢/٠٣ تا ٣٢/٣٦ درصد می‌باشد و به‌طور کلی مقدار قابلیت اطمینان زمانی از مقدار قابلیت حجمی بیش‌تر است (Islam *et al*., 2021; Karim *et al*., 2015). به‌طور مثال، در پژوهش Karim *et al*. (2015)، برای سقفی با مساحت ١٤٠ مترمربع، قابلیت اطمینان زمانی از سه تا ١٧ درصد و قابلیت اطمینان حجمی برای همان اندازه سقف بین ١٠ تا ٢٤ درصد متغیر است. آن‌ها دلیل این امر را تقاضای روزانه آب بیش‌تر نسبت به مقدار رواناب حاصل از بارندگی در روز در منطقه عنوان کردند. در صورتی‌که در پژوهش حاضر، تقاضای روزانه آب در طی بعضی از ماه‌های سال به‌دلیل تعطیلی‌بودن خوابگاه کاهش می‌یابد و در نتیجه تأمین تقاضای آب شرب از طریق شبکه آب شهری کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد، اثر حجم مخزن بر قابلیت اطمینان حجمی و زمانی یکسان است و افزایش حجم مخزن موجب بهبود قابلیت اطمینان حجمی و زمانی در سامانه‌های برداشت آب باران می‌شود که با پژوهش‌های Karim *et al*. (2015)، Islam *et al*. (2021) و Alim *et al*. (2020) مطابقت دارد. هم‌چنین شیب تغییرات قابلیت اطمینان در مخازن بزرگ‌تر نسبت به مخازن کوچک‌تر کم‌تر است، این امر به این دلیل است که، قابلیت اطمینان نه‌تنها به اندازه مخزن بلکه به عوامل تأمین (مانند شدت بارش و مساحت سقف) بستگی دارد. به‌طوری‌که با افزایش حجم مخزن ذخیره از ٣٠ مترمکعب به ٤٠ مترمکعب قابلیت اطمینان حجمی و زمانی حدود دو درصد افزایش می‌یابد. بنابراین حجم مخزن ذخیره مناسب برای این پژوهش ٣٠ مترمکعب انتخاب شد، زیرا به‌ازای یک مترمکعب افزایش مازاد بر این حجم، میزان پتانسیل ذخیره‌سازی کم‌تر از ٠/٢ درصد می‌باشد.

با توجه به حجم مخزن ذخیره، تقاضای آب و هم‌چنین ویژگی‌های بارش منطقه، ممکن است قسمتی از رواناب حاصل از آب باران از سامانه‌های RWH سرریز شده و از دسترس خارج شود. در شکل (٤) تغییرات ماهانه سرریز از سامانه برداشت آب باران با حجم مخزن ٣٠ مترمکعب برای ساختمان خوابگاه ارائه شد. حداکثر مقدار سرریز از سامانه RWH در ماه نوامبر با حدود ١٦/٥ مترمکعب اتفاق افتاد و در ماه می این مقدار ٠/٣ مترمکعب است. در نتیجه، با درنظرگرفتن حجم مخزن ٣٠ مترمکعب سالانه حدود ٨٩ مترمکعب و به‌طور متوسط ماهانه ٧/٤٢ مترمکعب رواناب حاصل از باران از سامانه RWH سرریز می‌شود.

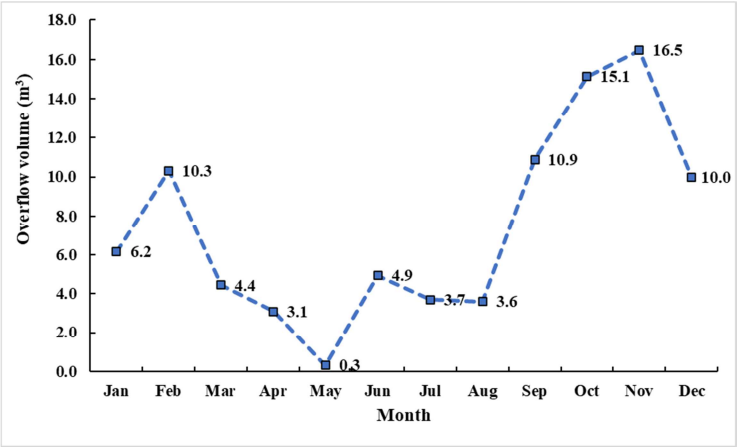

Figure 4. Monthly overflow volume of a RWH system with 30 m^3 tank volume and 850 m^2 roof area

الگوی آب مصرفی

حجم روزانه آب شرب موردنیاز خوابگاه، در صورت اسکان کامل دانشجویان، ٤/٥ مترمکعب می‌باشد (نیاز شرب ١٥ لیتر برای هر نفر). با توجه به کاهش جمعیت ساکن در خوابگاه در فاصله بین دو نیمسال آموزشی، نیاز آب شرب روزانه در ماه‌های بهمن، تیر، مرداد و شهریور به حدود ٠/٩ مترمکعب کاهش می‌یابد. شکل (٥) الگوی ماهانه آب شرب مصرفی از طریق سامانه آب شهری و سامانه RWH با حجم مخزن ٣٠ مترمکعب در خوابگاه را نشان می‌دهد. به‌طورکلی میانگین ماهانه آب شرب تحویلی از سامانه RWH به خوابگاه حدود ٢٦ مترمکعب است. این سامانه قادر است طی ماه‌های تر سال (اکتبر تا مارس)، حدود ٢٢٥ مترمکعب آب شرب تولید نماید که منجر به صرفه‌جویی ٣٢ درصد مصرف آب شهری می‌شود. در فصل تابستان که منطقه با کمبود آب شهری مواجه می‌باشد، اجرای سامانه RWH با حجم مخزن ٣٠ مترمکعب حدود ٤٠ درصد از نیاز آب شرب خوابگاه را تأمین خواهد کرد. به‌طورکلی، اجرای این سامانه در خوابگاه، سالانه حدود ٣٠٩ مترمکعب آب شرب تولید خواهد کرد، که این مقدار حدود ٢٦ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شهری در این خوابگاه را به‌همراه دارد.

ارزیابی کیفی رواناب

در جدول (٤) میانگین مقادیر پارامترهای مهم کیفی فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی نمونه‌های آب باران جمع‌آوری‌شده از سقف و استانداردهای بین‌المللی (WHO) و ملی آب آشامیدنی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات pH نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده در محدوده خنثی (٧/٩-٦/٥٢) بوده و براساس استانداردهای ملی و بین‌المللی محدودیتی برای مصرف شرب ندارد. اگرچه پارامتر pH به‌طور مستقیم بر سلامت اثر ندارد، اما یک پارامتر بسیار مهم در تعیین کیفیت آب به‌شمار می‌رود. مقادیر pH خارج از محدوده طبیعی نیاز به توجه بیش‌تر دارد زیرا ممکن است شرایط سمی را در آب ایجاد کند که می‌تواند برحلالیت آب تأثیرگذار باشد.

مقادیر اندازه‌گیری‌شده هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها از ٨١ تا ١٩٠ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است که از کیفیت مطلوب برای مصرف شرب برخوردار است. پارامتر COD، اکسیژن موردنیاز برای اکسیداسیون بخشی از مواد آلی در آب و فاضلاب است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر اندازه‌گیری‌شده این پارامتر از ١٧ تا ٤٢ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است.

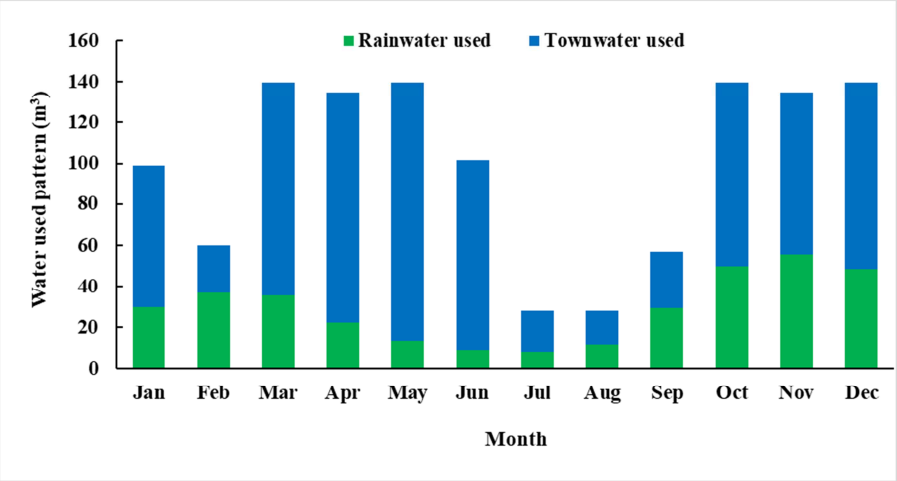

Figure 5. Monthly water used pattern with rainwater harvesting in the dormitory

Table 4. Measured means of important quality parameters of building roof runoff, international (WHO, 2004) and national standards (Iran Department of Environment 2016; Iran Deputy for Strategic Supervision, 2010)

Water quality parameters		Measured Mean	International Standard	National Standards		
			Drinking Water	Drinking Water	Irrigation Water	Drain to surface water
pH		7.33	6.5-8.5	6.5-8.5	6-8.5	6.5-8.5
EC (µs/cm)		113.2	300	1000	3000	-
BOD5 ($mg.l^{-1}$)		14.02	5	3	100	30
COD ($mg.l^{-1}$)		28.5	15	-	200	60
Turbidity (NTU)		15.32	5	1	50	50
Nitrate ($mg.l^{-1}$)		9.75	50	50	-	50
Phosphate ($mg.l^{-1}$)		0.33	-	-	-	6
Sodium ($mg.l^{-1}$)		1.93	200	200	-	-
Magnesium ($mg.l^{-1}$)		1.95	-	30	-	100
Calcium ($mg.l^{-1}$)		15	-	300	-	75
Chloride ($mg.l^{-1}$)		38.6	-	250	-	600
Bicarbonate ($mg.l^{-1}$)		22.72	-	-	-	-
Total Coliform (#/100 mL)		630	0	50	1000	1000
Fecal Coliform (#/100 mL)		584	0	20	400	400
Heavy metals	Manganese (ppb)	27.25	100	100	200	1000
	Zinc (ppb)	0.50	3000	3000	2000	2000
	Copper (ppb)	0.61	1000	1000	200	1000
	Cadmium (ppb)	0.014	3	3	10	100
	Lead (ppb)	4.16	10	10	500	1000
	Iron (ppb)	17.5	-	300	5000	3000

پارامتر BOD نیز میزان اکسیژن موردنیاز باکتری‌ها و سایر میکروارگانسیم‌ها را برای تجزیه هوازی مواد آلی مشخص می‌کند. مقادیر BOD به‌دست‌آمده در یک دوره پنج روزه از نمونه‌های آب باران، ۱۱ تا ۱۷ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، میزان COD و BOD نمونه‌ها خارج از استاندارد کیفی آب آشامیدنی است.

پارامتر کدورت نشان‌دهنده ذرات جامد معلق در آب است. این پارامتر خاصیت پراکندگی نور در آب است که می‌تواند به‌صورت مواد معدنی و یا آلی باشد. میزان کدورت اندازه‌گیری‌شده از رواناب باران بین ۱۱ تا ۲۲ NTU متغیر است. بدیهی است که این مقادیر بر اساس استانداردهای ملی و بین‌المللی برای آب آشامیدنی غیرقابل‌قبول می‌باشد، اما به‌عنوان یک منبع آب سطحی مناسب است که می‌تواند پس از تصفیه حتی برای آب آشامیدن مورداستفاده قرار گیرد.

مقایسه میانگین غلظت‌های کاتیون و آنیون‌های سدیم، منیزیم، کلسیم، کلر، نیترات، فسفات و بی‌کربنات در دوره موردبررسی با استانداردهای ملی و بین‌المللی نشان می‌دهد که تمام پارامترهای ذکرشده کم‌تر از استانداردهای مورد نظر بود و هم‌چنین غلظت هیچ‌کدام از نمونه‌ها طی دوره طرح خارج از محدوده استانداردهای آب آشامیدنی قرار نگرفت.

در یک اکوسامانه طبیعی ممکن است طیف گسترده‌ای از غلظت‌های فلزات سنگین وجود داشته باشد که منشأ طبیعی و انسانی دارند (John *et al.*, 2002). اندازه‌گیری‌های نمونه‌های آب باران نشان می‌دهد که مقادیر پارامترهای آهن (۰/۰۱ تا ۰/۰۳ میلی‌گرم بر لیتر)، منگنز (۲۰ تا ۳۵ ppb)، روی (۰/۳ تا ۰/٦ ppb)، مس (صفر تا ۲/٤٥ ppb)، کادمیوم (صفر تا ۰/۰٦ ppb) و سرب (۰/۳۳ تا ۸/٦ ppb) کم‌تر از حد استانداردهای آب آشامیدنی اندازه‌گیری شدند و در نتیجه این فلزات برای مصارف شرب محدودیتی ایجاد نمی‌کنند. باکتری کلیفرم مدفوعی (Fecal) نشان‌دهنده میکروارگانیسم‌های ناقل بیماری است که ممکن است در محیطی مشابه باکتری‌های کلیفرم مدفوعی زندگی کنند (Ranaee *et al.*, 2021; Zafarzadeh, 2006). وجود کل باکتری‌ها به تعداد ٤٩ تا بیش از ١٦٠٠ در ١٠٠ میلی‌لیتر و کلیفرم‌های مدفوعی به تعداد ٢٢ تا بیش از ١٦٠٠ در ١٠٠میلی‌لیتر در نمونه‌ها جمع‌آوری‌شده از باران، براساس استانداردهای WHO (WHO, 2004) و استاندارد ملی (Iran Department of Environment 2016; Iran Deputy for Strategic Supervision, 2010) آب باران برداشت‌شده را خارج از محدوده آشامیدن قرار می‌دهد این نتایج با پژوهش‌های Ranaee *et al.* (2021) و Sadoddin *et al.* (2012) مطابقت دارد.

به‌طورکلی، با استفاده از شاخص ملی کیفیت آب (IRWQI) کیفیت آب باران خام جمع‌آوری‌شده از سقف به‌عنوان آب سطحی (بدون انجام تصفیه) ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهد که آب در شرایط به نسبت خوب ($IRWQI_{SC}$ برابر ٦١/٢) و خیلی‌خوب ($IRWQI_{ST}$ برابر ٨٩/٥) دسته‌بندی می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد آب باران جمع‌آوری‌شده (خام) از سقف، فاقد برخی از الزامات استانداردهای ملی و بین‌المللی را برای آب آشامیدنی بود. از اینرو، در صورت نیاز به استفاده از آب جمع‌آوری‌شده برای مصارف شرب، لازم است سامانه تصفیه مناسب طراحی و اجرا شود.

سامانه تصفیه پیشنهادی

کیفیت آب جمع‌آوری‌شده از بام ساختمان‌ها به ویژگی‌های سقف و هم‌چنین شرایط آب‌وهوایی وابسته است. یافته‌های نشان داد که به‌طور خاص، استفاده از آب باران جمع‌آوری‌شده برای مصرف آشامیدنی (انسان یا دام) مستلزم انجام تصفیه برای کاهش کدورت، BOD5، COD و محتوای کلیفرم‌ها است. برای درنظرگرفتن مراحل مختلف تصفیه باید به این نکته توجه داشت که معمولاً در ابتدای شروع باران، جریان اولیه دارای غلظت بالای آلودگی است که با ادامه بارش این غلظت کاهش می‌یابد (Förster, 1996; Lye, 2009). از این‌رو، حذف مقدار مشخص از رواناب اولیه در کاهش بار آلودگی آب ورودی به مخزن ذخیره‌سازی نقش به‌سزایی خواهد داشت (He *et al.*, 2001). پژوهش Amin *et al.* (2013) نشان داد که، کیفیت آب باران جمع‌آوری‌شده از بام ساختمان پس از حدود یک میلی‌متر بارندگی نسبت به اولین جریان آب باران بهبود یافته است. در نتیجه پیشنهاد می‌شود تا در ابتدای سامانه جمع‌آوری سازه‌ای طراحی شود تا به‌صورت خودکار مانع از ورود حدود یک میلی‌متر باران یا معادل حجمی رواناب آن به مخزن شود.

هم‌چنین سامانه تصفیه (فیلتر شنی) نیز برای حذف ذرات درشت و هم‌چنین کاهش آلاینده‌های شیمیایی و میکروبیولوژی موردنیاز است (Hedegaard & Albrechtsen,

2014; Martinson, 2007; Sarrafzade & Rezaee, 2014) با این‌حال، این روش توانایی حذف ویروس‌ها و تک‌یاخته‌های انگلی ریزتر را ندارند (Sobsey *et al*., 2002). برای ضدعفونی و گندزدایی‌کردن آب روش‌های مختلفی از جمله کلرزنی، اشعه فرابنفش (UV)، اسمز معکوس و گندزدایی خورشیدی (SODIS)[9] وجود دارد (Jarvis *et al*., 2019; Mazhar *et al*., 2020; McGuigan *et al*., 2012; Park & Hu, 2010). هرکدام از این روش‌ها مزایا و معایب مختلفی دارد که باید با توجه به شرایط موجود روش مناسب انتخاب شود. در بین روش‌های مختلف، روش کلرزنی یک روش مرسوم برای ضدعفونی و غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌ها مطرح است. با این‌حال، روش کلرزنی به‌دلیل سمیت گاز کلر برای انسان، استفاده از آن در تجهیزات با مقیاس کوچک مناسب نیست. هم‌چنین روش‌های اسمز معکوس به‌دلیل کیفیت نسبتاً بالای آب باران و تولید حجم قابل توجه زه‌آب پیشنهاد نمی‌شود. گندزدایی خورشیدی به‌دلیل شرایط آب‌وهوایی منطقه در این پژوهش توصیه نمی‌شود (Sarrafzade & Rezaee, 2014). ازاین‌رو، در این طرح برای گندزدایی آب جمع‌آوری‌شده از بام ساختمان روش UV پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین می‌توان برای بهبود کارایی سامانه تصفیه از فیلتراسیون آرام ماسه‌ای نیز استفاده کرد. این روش بیش از آن‌که یک تصفیه فیزیکی باشد، یک فرایند تصفیه بیولوژیکی می‌باشد (Clark *et al*., 2012).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی کمی و کیفی آب باران جمع‌آوری‌شده از بام ساختمان‌ها دانشگاه علوم کشاورزی برای مصارف شرب انجام شد. برای ارزیابی قابلیت اطمینان سامانه برداشت آب باران برای مخازن مختلف ذخیره‌سازی، از مدل بیلان روزانه آب استفاده شد. ارزیابی قابلیت اطمینان حجمی و زمانی سامانه RWH با مساحت سقف ۸۵۰ مترمربع به‌منظور تأمین تقاضای آب شرب دانشجویان ساکن در خوابگاه، نشان داد که حجم مناسب برای ذخیره آب باران در این خوابگاه ۳۰ مترمکعب است. یافته‌ها براساس داده‌های دوره شاخص ۱۹ ساله (۱۳۹۷–۱۳۷۸) نشان داد، اجرای سامانه RWH با حجم مخزن ۳۰ مترمکعب قادر خواهد بود تا ۲۶ درصد از نیاز شرب خوابگاه با ظرفیت ۳۰۰ دانشجو را تأمین نماید و سالانه حدود ۳۰۹ مترمکعب در مصرف آب شهری صرفه‌جویی شود. با این‌حال، چنین سامانه‌ای توانایی برداشت ۱۰۰ درصد رواناب حاصل از آب باران را نخواهد داشت و سالانه حدود ۸۹ مترمکعب آب باران از سامانه سرریز می‌شود. برای بررسی کیفیت آب جمع‌آوری‌شده از سقف، از خروجی بام یکی از ساختمان‌ها دانشگاه از جنس ایرانیت نمونه‌برداری شد. پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های برداشت‌شده موردارزیابی قرار گرفت. با توجه به شاخص ملی کیفیت آب (IRWQI)، رواناب پشت‌بام در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در محدوده به نسبت خوب برای پارامترهای معمولی و خیلی‌خوب برای پارامترهای سمی دسته‌بندی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد، استفاده مستقیم از آب جمع‌آوری‌شده برای مصارف شرب دارای محدودیت می‌باشد و لازم است تا برخی از پارامترها از قبیل کدورت، COD، BOD، EC، پارامترهای میکروبی بهبود یابد. بر این اساس با توجه به میزان آب تولیدی سالانه پیشنهاد می‌شود تا ضمن استفاده از تانک شن برای بهبود پارامترهای فیزیکی (کدورت)، از سامانه UV برای گندزدایی و تصفیه میکروبی استفاده کرد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (با شماره قرارداد ۰۴-۱۳۹۹-۰۲) انجام شد؛ بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری این دانشگاه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

1. Rainwater Harvesting (RWH)
2. Water Balance Model (WBM)
3. Yield-After-Spillage (YAS)
4. Volumetric Reliability (Rv)
5. Time Reliability (Rt)
6. World Health Organization (WHO)
7. IRan Water Quality Index for Surface Water Resources-Conventional Parameters ($IRWQI_{SC}$)
8. IRan Water Quality Index for Surface Water Resources-Toxic Parameters ($IRWQI_{TC}$)
9. Solar disinfection (SODIS)

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Ahmed, J., Wong, L. P., Chua, Y. P., & Channa, N. (2020). Drinking water quality mapping using water quality index and geospatial analysis in primary schools of Pakistan. *Water*, 12(12), 3382.
2. Al-Batsh, N., Al-Khatib, I. A., Ghannam, S., Anayah, F., Jodeh, S., Hanbali, G., . . . van der Valk, M. (2019). Assessment of rainwater harvesting systems in poor rural communities: A case study from Yatta Area, Palestine. *Water*, 11(3), 585.
3. Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., & Shirin, S. (2020). Feasibility analysis of a small-scale rainwater harvesting system for drinking water production at Werrington, New South Wales, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122437.
4. Al-Khatib, I. A., Arafeh, G. A., Al-Qutob, M., Jodeh, S., Hasan, A., Jodeh, D., & van der Valk, M. (2019). Health risk associated with some trace and some heavy metals content of harvested rainwater in Yatta area, Palestine. *Water*, 11(2), 238.
5. Amin, M., Kim, T. i., Amin, M., & Han, M. (2013). Effects of Catchment, First-Flush, Storage Conditions, and Time on Microbial Quality in Rainwater Harvesting Systems. *Water Environment Research*, 85(12), 2317-2329.
6. Bakhtfirouz, A. (2011). *Study the effect of drainage systems on methane and carbon dioxide gas emissions from paddy fields (Case Study: Sari Aria)*. (M.Sc.), Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University. (In Persian)
7. Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and sewage works*, 117(10).
8. Clark, P. A., Pinedo, C. A., Fadus, M., & Capuzzi, S. (2012). Slow-sand water filter: Design, implementation, accessibility and sustainability in developing countries. Medical science monitor: international medical *journal of experimental and clinical research*,18(7), RA105.
9. Förster, J. (1996). Patterns of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. *Water science and technology*, 33(6), 39-48.
10. Ghisi, E., Bressan, D. L., & Martini, M. (2007). Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. *Building and Environment*, *42*(4), 1654-1666.
11. Gholamhossien pour jafari nejad, A., Alizadeh, A., & Neshat, A. (2013). Study on Ecological Water Footprint and indicators of virtual water in Agricultural Section of Kerman Province. *Irrigation and Water Engineering*, 4(1), 80-89. (In Persian)
12. Haque, M. M., Rahman, A., & Samali, B. (2016). Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production*, 137, 60-69.
13. He, W., Wallinder, I. O., & Leygraf, C. (2001). A laboratory study of copper and zinc runoff during first flush and steady-state conditions. *Corrosion science*, 43(1), 127-146.
14. Hedegaard, M. J., & Albrechtsen, H.-J. (2014). Microbial pesticide removal in rapid sand filters for drinking water treatment–potential and kinetics. *Water Research*, 48, 71-81.
15. 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? *Water*, 11(3), 511.
16. Imteaz, M. A., Adeboye, O. B., Rayburg, S., & Shanableh, A. (2012). Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. Resources, *Conservation and Recycling,* 62, 51-55.
17. Imteaz, M. A., Ahsan, A., Naser, J., & Rahman, A. (2011). Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. Resources, *Conservation and Recycling*, 56(1), 80-86.

18. IPCC, C. C. (2014). *Synthesis report: approved summary for policymakers*. IPCC, Geneva.
19. Iran Department of Environment (2016). *Iranian water quality standard*. (In Persian).
20. Iran Department of Environment. (2012). *Guideline for Iran water quality Index*. (In Persian).
21. Iran Deputy for Strategic Supervision. (2010). Environmental criteria for the reuse of returned water and wastewater. (In Persian).
22. Islam, M. M., Afrin, S., Tarek, M. H., & Rahman, M. M. (2021). Reliability and financial feasibility assessment of a community rainwater harvesting system considering precipitation variability due to climate change. *Journal of environmental management*, *289*, 112507.
23. Jarvis, P., Autin, O., Goslan, E. H., & Hassard, F. (2019). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LED) to full-scale drinking-water disinfection. *Water*, 11(9), 1894.
24. Jenkins, D., & Pearson, F. (1978). Feasibility of rainwater collection systems in California. *Contribution-California. University*.
25. John, D. M., Whitton, B. A., Brook, A. J., York, P. V., & Johnson, L. R. (2002). The freshwater algal flora of the British Isles: an identification guide to freshwater and terrestrial algae: *Cambridge University Press*.
26. Karim, M. R., Bashar, M. Z. I., & Imteaz, M. A. (2015). Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting in a megacity in Bangladesh. Resources, *Conservation and Recycling*, 104, 61-67.
27. Khastagir, A., & Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), 181-188.
28. Kingsborough, A., Borgomeo, E., & Hall, J. W. (2016). Adaptation pathways in practice: Mapping options and trade-offs for London's water resources. *Sustainable Cities and Society*, 27, 386-397.
29. Kirs, M., Moravcik, P., Gyawali, P., Hamilton, K., Kisand, V., Gurr, I., . . . Ahmed, W. (2017). Rainwater harvesting in American Samoa: current practices and indicative health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12384-12392.
30. Kolavani, N. J., & Kolavani, N. J. (2020). Technical feasibility analysis of rainwater harvesting system implementation for domestic use. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102340.
31. Lye, D. J. (2009). Rooftop runoff as a source of contamination: A review. *Science of the total environment*, 407(21), 5429-5434.
32. Martinson, D. (2007). Improving the viability of roofwater harvesting in low-income countries. School of Engineering, *University of Warwick*.
33. Mazhar, M. A., Khan, N. A., Ahmed, S., Khan, A. H., Hussain, A., Changani, F., . . . Vambol, V. (2020). Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water–a review. *Journal of Cleaner Production*, 273, 123159. (In Persian)
34. McGuigan, K. G., Conroy, R. M., Mosler, H.-J., du Preez, M., Ubomba-Jaswa, E., & Fernandez-Ibanez, P. (2012). Solar water disinfection (SODIS): a review from bench-top to roof-top. *Journal of hazardous materials*, 235, 29-46.
35. Meera, V., & Mansoor Ahammed, M. (2018). Factors affecting the quality of roof-harvested rainwater. In Urban Ecology, *Water Quality and Climate Change* (pp. 195-202): Springer.
36. Mokhtari, S. A., Fazlzadeh Davil, M., & Dorraji, B. (2011). Survey of Bacteriological Quality of the Drinking Water in Rural Areas of Ardabil City. *Journal of Health*, 2(1), 66-73. (In Persian)
37. Nachshon, U., Netzer, L., & Livshitz, Y. (2016). Land cover properties and rain water harvesting in urban environments. *Sustainable Cities and Society*, 27, 398-406.
38. Pahlevani, P. (2017). Evaluating the Potential of Rainwater Quantity and Quality from Roof Catchments in Different Climatic Conditions (Case study: Noor and Mashhad cities). (MSc), *Ferdowsi University of Mashhad*. (In Persian)
39. Park, S.-k., & Hu, J. Y. (2010). Assessment of the extent of bacterial growth in reverse osmosis system for improving drinking water quality. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 45(8), 968-977.
40. Rahman, S., Khan, M., Akib, S., Din, N. B. C., Biswas, S., & Shirazi, S. (2014). Sustainability of rainwater harvesting system in terms of water quality. *The Scientific World Journal*, 2014.
41. Ranaee, E., Abbasi, A. A., Tabatabaee Yazdi, J., & Ziyaee, M. (2021). Feasibility of Rainwater Harvesting and Consumption in a Middle Eastern Semiarid Urban Area. *Water*, 13(15), 2130.
42. Sadoddin, A., Beyrodiyan, N., Karimi, D., Naeimi, A., Bai, M., & Jandaghi, N. (2012). Feasibility study of appropriate technology for rooftop rainwater harvesting system for The Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. *Retrieved from The Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource* (Research report), 103p. (In Persian).
43. Sarrafzade, M. H., & Rezaee, M. (2014). Quality of Rainwater Collected from the Roof and Its Treatment Methods. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 2(3), 41-52. (In Persian)

44. Sobsey, M. D., Water, S., & Organization, W. H. (2002). *Managing water in the home: accelerated health gains from improved water supply*. Retrieved from
45. Steffen, J., Jensen, M., Pomeroy, C. A., & Burian, S. J. (2013). Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in US cities. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(4), 810-824.
46. Taran, F., & Mahtabi, G. (2016). Investigation of Supplying Water Requirements in Different Parts of a City through Rainwater Harvesting ;a Case Study Bonab, Iran. *Irrigation and Water Engineering*, 7(1), 40-53. (In Persian)
47. Tavakol-Davani, H., Goharian, E., Hansen, C. H., Tavakol-Davani, H., Apul, D., & Burian, S. J. (2016). How does climate change affect combined sewer overflow in a system benefiting from rainwater harvesting systems? *Sustainable Cities and Society*, 27, 430-438.
48. WHO, G. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization, 216, 303-304.
49. WHO. (2004). *Guidelines for drinking-water quality* (Vol. 1): World Health Organization.
50. Zafarzadeh, A. (2006). The determination of water chemical quality of cisterns in rural areas of Golestan province. *Journal of Gorgan University of Medical Sciences*, 8(1), 51-54. (In Persian)
51. Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., & Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of arid environments*, 57(4), 487-505.