



The Technical and Economic Feasibility Assessment of a Rainwater Harvesting System for the Production of Packaged Drinking Water under Climate Change; The Case of Sari University in Northern Iran

M.A. Gholami Sefidkouhi^{1*} and Z. Bagheri Khalili²

Abstract

Due to the increase in population and the uncertainty of safe water supply, the use of rainwater harvesting systems has gained popularity in recent years. This research has evaluated the technical and financial feasibility of these systems in the production of packaged water at Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. In the first step, daily rainfall was predicted for the period of 2022-2047 using the historical data of Dashtnaz weather station in Sari and those of the GFDL-CM3 climate model. The daily Water balance modeling and financial indicators (IRR, NPV, and B/C) were used to analyze the technical and financial aspects of the systems with catchment levels of 200, 850, and 1700 m². Findings showed that aiming at supplying the daily requirement drinking water of the university, increasing the daily treatment capacity of this system has no effect on its performance in this area. According to the financial index, storage tanks with volumes of 8, 20, and 40 m³ are suitable for systems with catchment levels of 200, 850, and 1700 square meters, respectively. The financial indicators (IRR, NPV and B/C) were respectively 45%, 917 million Rials and 1.2 for the catchment area of 200 m², 103%, 4768 million Rials and 1.31 for the catchment area of 850 m², and 117%, 8918 million Rials and 1.33 for the catchment area of 1700 m².

Keywords: Financial Evaluation, Storage Tank Size, Daily Treatment Capacity, Sari, Climate Models.

Received: September 5, 2022

Accepted: January 4, 2023

امکان‌سنجی فنی و مالی سامانه استحصال آب باران برای تولید آب شرب بسته‌بندی در شرایط تغییر اقلیم؛ مطالعه موردی، ساری، شمال ایران

محمدعلی غلامی سفیدکوهی^{۱*} و زهرا باقری خلیلی^۲

چکیده

طی سال‌های اخیر، با توجه به افزایش جمعیت و عدم قطعیت تأمین منابع آب سالم، استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران جایگاه ویژه‌ای یافته است. هدف از این تحقیق ارزیابی فنی و مالی این سامانه در تولید آب بسته‌بندی در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری می‌باشد. در گام اول با استفاده از داده‌های تاریخی ایستگاه هواشناسی دشت‌ناز ساری و مدل اقلیمی GFDL-CM3، مقدار بارش روزانه برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۴۷ پیش‌نگری شد. به منظور تحلیل فنی و مالی سامانه‌هایی با سطوح آبیگر ۲۰۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ مترمربع، از مدل روزانه بیلان آب و شاخص‌های مالی (IRR، NPV و B/C) استفاده شد. یافته‌ها نشان می‌دهد؛ با هدف تأمین نیاز روزانه آب شرب بسته‌بندی دانشگاه، افزایش ظرفیت تصفیه روزانه این سامانه، تأثیری بر عملکرد آن در این منطقه ندارد. از منظر شاخص مالی مخزن ذخیره با حجم ۸، ۲۰ و ۴۰ مترمکعب به ترتیب برای سامانه‌های با سطوح آبیگر ۲۰۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ مترمربع مخزن مناسب است. شاخص‌های مالی سه‌گانه فوق به ترتیب ۴۵ درصد، ۹۱۷ میلیون ریال و ۱/۲ برای سطح آبیگر ۲۰۰ متر مربع، ۱۰۳ درصد، ۴۷۶۸ میلیون ریال و ۱/۳۱ برای سطح آبیگر ۸۵۰ مترمربع و ۱۱۷ درصد، ۸۹۱۸ میلیون ریال و ۱/۳۳ برای سطح آبیگر ۱۷۰۰ مترمربع می‌باشد.

کلمات کلیدی: ارزیابی مالی، حجم مخزن ذخیره‌سازی، ظرفیت تصفیه روزانه، ساری، مدل‌های اقلیمی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۶/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

1- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: magholamis@yahoo.com

2- Ph.D. Candidate, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.4.6.0](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.4.6.0)

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۲ امکان‌پذیر است.



با توجه به افزایش جمعیت و عدم قطعیت تأمین منابع آب در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران از محبوبیت بالایی برخوردار شده است. این شیوه در مناطق مختلف اقلیمی جهان، حتی نقاطی از خاورمیانه که دارای شرایط اقلیمی خشک می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت و باعث نتایج تاثیرگذار و ثمربخش در تأمین آب شد (Lange et al., 2012). بطوری که امروزه این سامانه‌ها جزء منابع تأمین قابل اتکا برای نیاز آب شرب به‌شمار می‌رود (Haq, 2017). پژوهشی در ایالات متحده نشان داد که کاهش تنها ۱۰٪ از تقاضای آب آشامیدنی به سامانه آبرسانی شهری، صرفه‌جویی در حدود ۳۰۰ میلیارد کیلووات ساعت در سال را به همراه دارد (Kloss and Lukes, 2008). بنابراین این سامانه‌ها علاوه بر تأمین نیاز آبی، ارزش افزوده اقتصادی را نیز به همراه خواهد داشت. همچنین، در کنار صرفه‌جویی در میزان مصرف انرژی و کاهش تقاضا از سامانه‌های موجود آبرسانی، بر کاهش و کنترل میزان رواناب‌های سطحی و سیلاب نیز مؤثر است (Kim and Han, 2008; Barthwal et al., 2014; Teston et al., 2018). ایرانی‌ها در حال حاضر بیش از ۷۰ درصد از منابع آب شیرین تجدیدپذیر خود را برای تأمین نیازهای خود استفاده می‌کنند، در حالی که استفاده بیش از ۴۰ درصد از این منابع به معنای وارد شدن به حالت تنش آبی است (Madani, 2005; Madani et al., 2016). در شمال ایران علیرغم میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۱۵۲ میلی‌متر، هنوز به صورت نظامند پتانسیل‌ها و قابلیت‌ها ی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران بررسی نشده است. از اینرو، بررسی، امکان‌سنجی و توجیه فنی و مالی استفاده از این سامانه‌ها در مقیاس خرد این امکان را فراهم می‌آورد تا راه برای بهره‌برداری‌های کلان و سرمایه‌گذاری پربازده نیز فراهم شود تا علاوه بر رفع نیاز جامعه به آب شرب، پایداری اکوسیستم و محیط‌زیست در کنار تقویت نبض بازار محلی و منطقه‌ای رونق یابد.

امروزه آب آشامیدنی به عنوان یک کالای اقتصادی محسوب می‌شود که بصورت بسته‌بندی شده یا لوله‌کشی به بازار عرضه می‌شود. بنابراین سامانه‌های تأمین و عرضه آب آشامیدنی باید از توجیه مالی برخوردار باشند و برای تولید کننده آب آشامیدنی سودآوری داشته باشند. تجزیه و تحلیل متغیرهای مالی ابزاری برای ارائه مزایای سامانه‌های RWH به سرمایه‌گذاران می‌باشد (Severis et al., 2019). بطور مثال، Lima et al. (2021) امکان‌سنجی مالی سامانه استحصال آب باران از سقف آپارتمان‌ها ی مسکونی با هدف تصفیه و استفاده برای مصارف غیرشرب در برزیل را بررسی کردند. نتایج نشان داد، سامانه‌ای با مساحت آبیگیر ۱۰۰ مترمربع برای تأمین نیاز آب آشامیدنی ماهانه ۱۴۶

پژوهش‌ها نشان می‌دهد علاوه بر رشد سریع جمعیت، تغییرات آب و هوایی نیز از عوامل مؤثر در تغییر کمی و کیفی منابع آب می‌باشد (Chen and Xu, 2005; Elmahdi et al., 2009; Haque et al., 2013; 2014; 2015). علاوه بر این، تغییرات آب و هوایی بر تغییرات فصلی و توزیع‌های مکانی بارندگی نیز تأثیر می‌گذارد و در آینده شرایط کمبود آب در جهان را حادثر خواهد نمود (Haque et al., 2016). مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم در بسیاری از نقاط جهان به طور عینی درک شده است (Ren et al., 2002; Fang et al., 2007; Shahid et al., 2012). از اینرو، برای اطمینان از تأمین آب کافی، مسائل مربوط به تغییرات اقلیمی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب باید مورد توجه قرار گیرد. تأمین آب کافی و با کیفیت نیازمند زیرساخت‌های لازم از جمله انرژی می‌باشد. از اینرو، کشورهای مختلف، پیوسته گزینه‌های مختلف مدیریتی را برای شناسایی راهکارهای کاهش مصرف آب و کشف منابع جدید در راستای مدیریت سبز را پیش می‌کنند. یکی از روش‌هایی که به طور مستقیم باعث کاهش اتکاء به منابع آب معمول می‌شود، سامانه استحصال آب باران (RWH) است.

سامانه‌های RWH دارای اجزاء مختلف می‌باشد که تعیین بهینه هر یک از اجزاء، پایداری آن را به همراه داشته باشد. بطور مثال در ارتباط با تعیین اندازه بهینه مخزن ذخیره، چنانچه مخزن با ظرفیت زیاد انتخاب شود، نتیجه آن هدر دادن هزینه خواهد بود. در مقابل در صورت انتخاب مخزن با حجم کمتر از حجم بهینه، تأمین آب مورد نیاز امکان‌پذیر نخواهد بود (Haque et al., 2016). برخی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد این سامانه‌ها شامل مساحت سقف، حجم مخزن، مقدار آب مورد نیاز و مقدار فیلتراسیون روزانه در استرالیا مورد بررسی قرار گرفت (Alim et al., 2020). نتایج نشان داد در صورت استفاده از این سامانه در مقیاس کوچک (متناسب با مساحت سقف)، با اطمینان ۹۰ الی ۹۷ درصد آب شرب سالانه یک خانوار تأمین خواهد شد. مطالعات زیادی در مورد امکان‌سنجی استفاده از این سامانه‌ها انجام شده است (Herrmann and Schmida, 2000; Fengtai and Xiaochao, 2012; Ghisi and Ferreira, 2007; Aladenola and Adeboye, 2010; Steffen et al., 2013; Palla et al., 2012; Imteaz et al., 2011a; 2011b; Rahman et al., 2012; Alim et al., 2020). اکثر این پژوهش‌ها براساس داده‌های تاریخی و گذشته آب و هوایی بوده است و به ندرت به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر قابلیت اطمینان سامانه در دوره آتی پرداخته است (Wallace et al., 2015; Haque et al., 2016; Basinger et al., 2010).

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌ها و منطقه

در این پژوهش عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران برای دوره پایه و آینده براساس سناریوهای تغییر اقلیم بررسی شد. بدین منظور دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که در شمال ایران و محدوده شهرستان ساری واقع شده است، به‌عنوان پایلوت انتخاب شد (شکل ۱). از داده‌های تاریخی بارندگی روزانه در بازه ۲۰۲۰-۲۰۰۰ ایستگاه دشت ناز استفاده شد. برای پیش‌بینی داده‌های بارندگی روزانه در آینده، از مولد داده‌های هواشناسی تصادفی، LARS-WG6 استفاده شد. در این مدل، خواص آماری داده‌های تولید شده مشابه دوره پایه است اما انحراف معیار داده‌ها ی آن‌ها ممکن است متفاوت باشد (Rahimi & Rahimi, 2018). در گام نخست، مدل برای بازه زمانی شاخص اجرا شد و بارش اندازه‌گیری و تولیدشده روزانه با هم مقایسه و با استفاده از آزمون تی-استودنت، همبستگی مقادیر مورد آزمون قرار گرفت. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان می‌دهد که داده‌ها تاریخی و تولید شده در ماه‌های مختلف از همبستگی خوبی برخوردار بوده و براساس آماره ارزیابی، مدل از قابلیت مناسبی در پیش‌بینی برخوردار است. در مرحله بعد براساس مدل گردش عمومی جو GFDL-CM3، تحت سناریوهای RCP4.6 و RCP8.5 به ترتیب به‌عنوان سناریوی خوشبینانه و بدبینانه، از مدل‌های اقلیمی CMIP5، داده‌های آبی برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۷ پیش‌بینی تا برای ارزیابی سامانه‌های استحصال آب باران استفاده شود.

۲-۲- سامانه استحصال باران

با توجه به تعدد ساختمان با سقف شیروانی در سایت دانشگاه، سه سقف با مساحت ۲۰۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ مترمربع برای بررسی موضوع پژوهش انتخاب شد. شکل ۲ اجزای سامانه استحصال باران را نشان می‌دهد. به منظور جلوگیری از سرریز آب باران در سامانه RWH، مخزن با حجم مناسب برای ذخیره‌سازی در نظر گرفته شد. برای تعیین مناسب‌ترین حجم مخزن ذخیره، شاخص کارایی سامانه‌های استحصال آب باران برای مخازن ۵، ۸، ۱۲، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ مترمکعب بررسی شد. استفاده از آب باران جمع‌آوری شده از سقف‌های سایت دانشگاه برای شرب، مستلزم انجام تصفیه برای کاهش کدورت، BOD5، COD و محتوای کلیفرم‌ها می‌باشد (Gholami and Bagheri, 2022). بنابراین به منظور حذف ناخالص‌های فیزیکی و آلودگی‌های میکروبی، واحد تصفیه شامل فیلتر شنی و کلرزی تریقی در نظر گرفته شد.

مترمکعب برای هر آپارتمان، از نظر اقتصادی امکان‌پذیر است. علاوه بر این، بازگشت سرمایه پس از حدود ۳/۵ سال محقق می‌شود. در پژوهش (Abas and Mahlia, 2019) هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری و قیمت کنونی آب به عنوان عوامل بازدارنده اجرای این سامانه شناسایی شدند بطوری که در صورت افزایش ۲۰۰ درصدی قیمت فعلی آب و کاهش ۴۵ درصد در هزینه اولیه سرمایه‌گذاری، بازار سامانه‌های RWH در کشور برونی رقابتی خواهد شد. Zavala et al. (2018) امکان‌سنجی استفاده از سامانه استحصال آب برای تأمین نیاز یک شرکت حمل و نقل در مکزیکوسیتی را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد، بازگشت سرمایه این طرح پس از حدود ۵ سال محقق خواهد شد و مقادیر NPV، IRR و B/C به ترتیب ۵۰۴۸/۳ دلار، ۵/۷ درصد و ۱/۹ خواهد بود. بی شک علاوه برای ویژگی‌های فنی، قیمت آب تولیدی نیز بر سودآوری طرح بسیار اثرگذار می‌باشد. بطور مثال، (Sadoddin et al., 2015) در پژوهشی در گرگان نشان دادند که با اعمال قیمت تجاری آب به عنوان درآمد در مقایسه با قیمت یارانه‌ای آب بهاء، بازگشت سرمایه طرح پس از ۱ سال محقق می‌شود. این در حالی است که در صورت اعمال قیمت فروش مطابق آب‌بهای یارانه‌ای، این شاخص بیش از ۱۷ سال طول خواهد کشید.

هرچند پژوهش‌های متعددی در زمینه جمع‌آوری و استحصال آب باران از سطوح غیر قابل نفوذ شهری و پشت بام‌ها برای تأمین نیازهای آب بهداشتی در ایران انجام شده است؛ اما در زمینه تولید آب شرب به‌عنوان کالای اقتصادی کمتر بدان پرداخته شده است (Kolavani & Kolavani, 2020; Taran & Mahtabi, 2016; Sadoddin et al., 2015). از طرفی به دلیل ارزان بودن آب شرب شهری در ایران، طرح‌های تأمین آب شرب از طریق سامانه‌های استحصال آب باران، فاقد جذابیت مالی است. به همین خاطر گسترش این سامانه‌ها در ایران نسبت به سایر کشورها با سرعت کمتری اتفاق خواهد افتاد. در این پژوهش، با هدف امکان‌سنجی و ارزیابی فنی و مالی سامانه‌های استحصال آب باران به عنوان کارخانه‌های کوچک تولید آب آشامیدنی بسته‌بندی، پرداخته می‌شود. بی‌تردید، درک چگونگی تغییر در عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران در پاسخ به تغییرات اقلیم، بعنوان یک مؤلفه حیاتی در برنامه‌ریزی، مدیریت و توسعه ضروری است. از این رو، تعیین بهینه حجم مخزن ذخیره‌سازی و تأثیر تغییرات ظرفیت تصفیه روزانه بر عملکرد این سامانه بررسی خواهد شد. از آنجایی که ابعاد و زوایای مختلف این مبحث مکان محور می‌باشد، شهرستان ساری به عنوان پایلوت انتخاب شد.

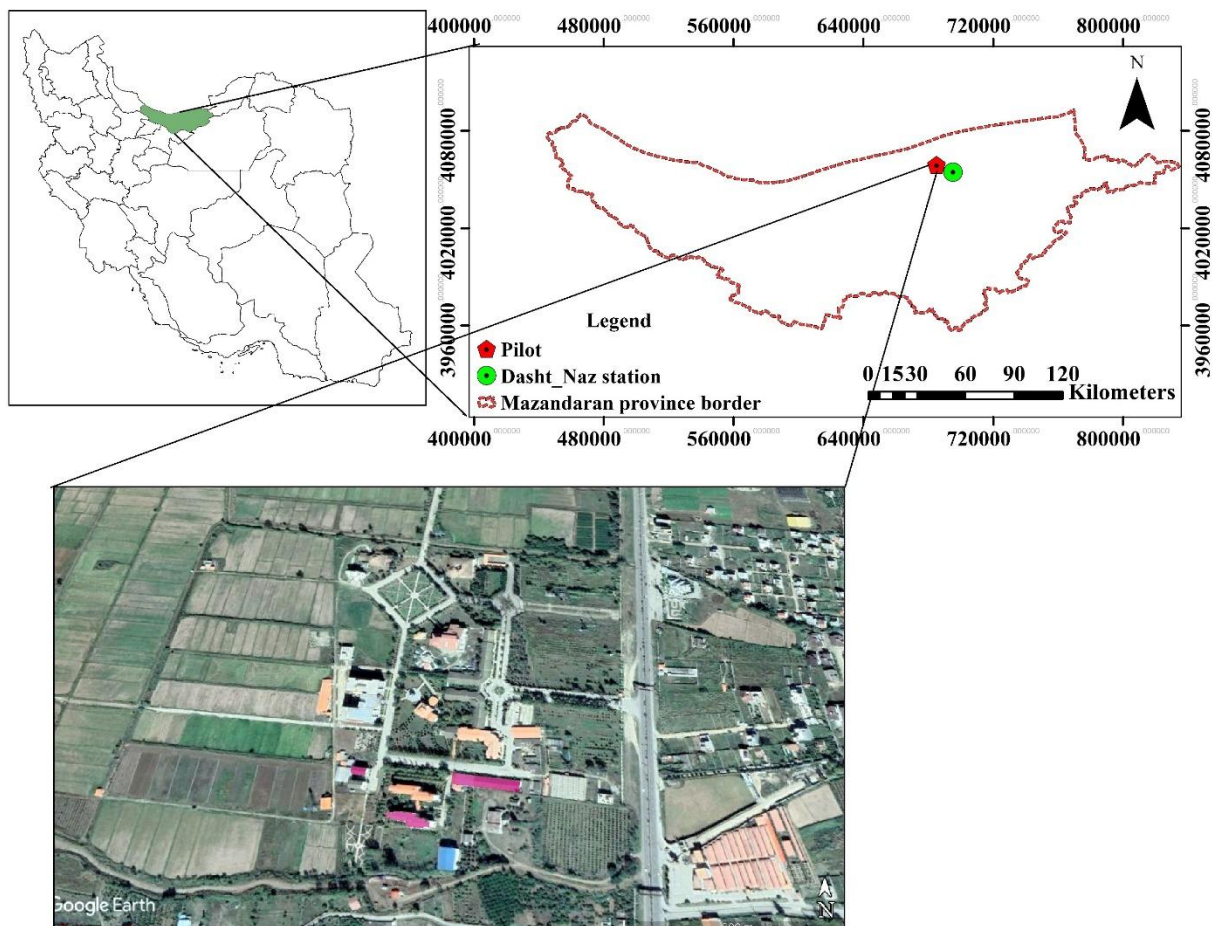


Fig. 1- Location of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (pilot)

شکل ۱- موقعیت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (پایلوت)

۲-۳- مدل بیلان آب

به منظور انتخاب مناسب‌ترین حجم مخزن ذخیره و ظرفیت تصفیه روزانه، از مدل روزانه بیلان آب با دو رویکرد تولید پس از سرریز (YAS)^۳ و تولید قبل از سرریز (YBS)^۴ که توسط Jenkins et al. (1978) توسعه یافت، استفاده شد. در این مدل در یک بازه زمانی مشخص، مخزن به‌عنوان حجم کنترل، رواناب سقف به‌عنوان ورودی و آب تصفیه شده، تلفات و سرریز به‌عنوان خروجی محسوب می‌شود.

با فرض استفاده بر خط از آب تصفیه شده، ظرفیت فیلتراسیون به عنوان عامل محدود کننده در مدل بیلان در نظر گرفته شد. رابطه ۱ مدل بیلان روزانه آب را بیان می‌دارد:

$$SLAT_i = R_i + SLAT_{i-1} - SP_i - WT_i \quad (1)$$

همچنین، با هدف اضافه نمودن برخی املاح معدنی مورد نیاز آب شرب، فیلتر معدنی طراحی شد. به منظور انتخاب ظرفیت مناسب تصفیه روزانه در سطوح مختلف سقف، شاخص کارایی سامانه‌های استحصال آب باران برای ۱۰ ظرفیت تصفیه (از ۳/۵ تا ۱۸ مترمکعب در روز) محاسبه و با ظرفیت تصفیه برابر با نیاز روزانه آب بسته‌بندی در دانشگاه مقایسه شد تا بتوان مناسبترین ظرفیت را انتخاب نمود. در این مقاله نیاز روزانه آب شرب بسته‌بندی در دانشگاه طی ماه‌های مختلف سال متفاوت است؛ زیرا با شروع سال تحصیلی و افزایش جمعیت دانشجویان، بازگشایی غذاخوری دانشگاه و برگزاری رویدادهای مختلف علمی و فرهنگی، نیاز به آب شرب بسته‌بندی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به استعلام انجام شده، نیازمندی روزانه آب بسته‌بندی در ماه‌های پرتردد (مهر، آبان، آذر، دی، اسفند، فروردین، اردیبهشت و خرداد) ۴/۵ مترمکعب و در ماه‌های کم تردد (بهمن، تیر، مرداد، شهریور) ۰/۹ مترمکعب، نیاز سالانه آب بسته‌بندی شده ۱۲۰۰ مترمکعب برآورد می‌شود.

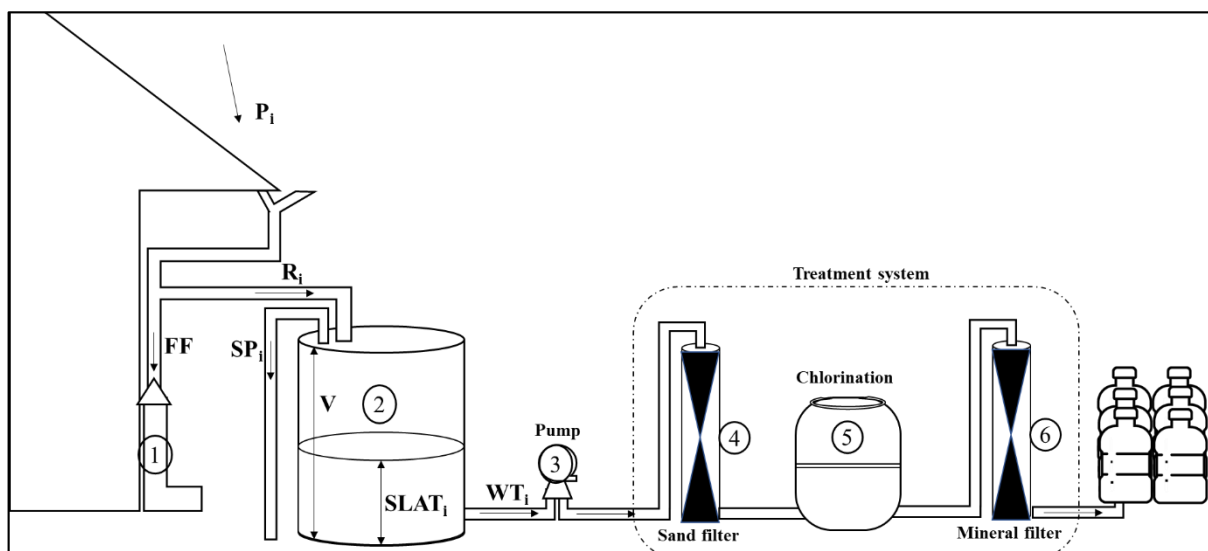


Fig. 2- Components of rainwater harvesting system (1- first flush, 2- water storage tank, 3- pump, 4- sand filter, 5- chlorination step, 6- mineral filter, and 7- packaging)

شکل ۲- اجزای سامانه استحصال آب باران (۱- سیفون اولیه، ۲- مخزن ذخیره آب، ۳- پمپ، ۴- فیلتر سنی، ۵- مرحله کلرزی، ۶- فیلتر معدنی، ۷- بسته‌بندی)

$$WT_i = \min \left\{ \begin{array}{l} FD \\ SLAT_{i-1} + R_i \end{array} \right. \quad (4)$$

$$SLAT_i = \min \left\{ \begin{array}{l} SLAT_{i-1} + R_i - WT_i \\ V \end{array} \right.$$

که در آن، FD ، ظرفیت تصفیه (مترمکعب در روز) و V حجم مخزن (مترمکعب) می‌باشد.

همچنین، برای شرایطی که ظرفیت تصفیه روزانه (FD) بیش‌تر از نیاز روزانه آب بسته‌بندی (D_i) باشد، میزان تصفیه مازاد ذخیره و در روزهای آتی از آن استفاده می‌شود. بر این اساس، مقدار مازاد آب تولیدی، براساس روابط ۵ و ۶ در محاسبات بیلان آب روزانه لحاظ می‌شود.

$$UW_i = \min \left\{ \begin{array}{l} D_i \\ SW_{i-1} + WT_i \end{array} \right. \quad (5)$$

$$SW_i = SW_{i-1} + WT_i - UW_i \quad (6)$$

که در آن، UW_i ، حجم آب مصرفی در روز نام (مترمکعب)، D_i ، نیاز روزانه آب بسته‌بندی (مترمکعب)، SW_i و SW_{i-1} ، به‌ترتیب حجم آب آشامیدنی مازاد در روز $i-1$ نام و نام (مترمکعب) می‌باشد.

به‌منظور ارزیابی حجم مناسب ذخیره‌سازی و ظرفیت تصفیه روزانه، از شاخص‌های قابلیت اطمینان حجمی $(RV)^5$ و قابلیت اطمینان زمانی $(Rt)^6$ به‌ترتیب از روابط ۷ و ۸ استفاده شد. قابلیت اطمینان حجمی بیانگر پتانسیل سالانه صرفه‌جویی آب شرب و قابلیت اطمینان زمانی، تعداد روزهایی که برای تامین تقاضای آب شرب بسته‌بندی، نیاز به سایر بازار نباشد، را نشان می‌دهد.

که در آن، $SLAT_i$ ، حجم آب ذخیره شده در مخزن در روز i نام (مترمکعب)، $SLAT_{i-1}$ ، حجم آب ذخیره شده در مخزن در روز $i-1$ نام (مترمکعب)، R_i ، حجم رواناب ورودی به مخزن در روز نام (مترمکعب)، SP_i ، حجم سرریز شده از مخزن در روز نام (مترمکعب)، WT_i ، حجم آب تصفیه شده در روز نام (مترمکعب) است. مقدار R_i با استفاده از رابطه ۲ تخمین زده شد:

$$R_i = CA \times ((P_i \times SR) - FF) \quad (2)$$

که در آن، P_i ، ارتفاع بارندگی در روز نام (متر)، SR ، مساحت سقف (مترمربع)، CA ، ضریب رواناب، FF ، حجمی از رواناب برای شست‌وشوی اولیه سقف در هر بارش (مترمکعب) هستند.

اولین جریان حاصل از بارندگی بر روی سقف، توانایی بالایی در شست‌وشوی بسیاری از آلاینده‌ها را دارد (Lye, 2009). باستناد بررسی‌های انجام شده، رواناب حاصل از یک میلی‌متر بارندگی اولیه برای شست‌وشوی اولیه کافی است. علاوه بر این، قسمتی از رواناب کل به دلیل تبخیر، نشست و انحراف از مسیر جمع‌آوری آب باران، تلف خواهد شد. بااستناد (Alim et al., 2020) ضریب رواناب 0.85 در نظر گرفته شد. روابط ۳ و ۴ به ترتیب رویکردهای YAS و YBS در مدل بیلان روزانه را بیان می‌دارد:

$$WT_i = \min \left\{ \begin{array}{l} FD \\ SLAT_{i-1} + R_i - WT_i \end{array} \right. \quad (3)$$

$$SLAT_i = \min \left\{ \begin{array}{l} SLAT_{i-1} + R_i - WT_i \\ V - WT_i \end{array} \right.$$

در روز برای سطوح مختلف مورد بررسی در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شد. درآمدهای ناخالص طرح شامل فروش آب شرب بسته‌بندی در ایران (۱۳۱۶۰ هزار ریال بر مترمکعب در سال ۱۴۰۱) می‌باشد. عمر پروژه نیز مطابق استانداردهای ایران و جهان معادل ۲۵ سال (Severis et al., 2019) در نظر گرفته شد. بر این اساس جریان نقدینگی هر یک از سناریوهای تشکیل و شاخص‌های مالی مد نظر محاسبه شد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- بارش و رواناب

شکل ۳ بارندگی ماهانه دوره تاریخی (۲۰۲۰-۲۰۰۰) و دوره آتی (۲۰۴۷-۲۰۲۲) بر اساس دو سناریوی RCP4.6 و RCP8.5 مدل GFDL-CM3 را نشان می‌دهد. متوسط بارندگی سالانه در دوره تاریخی ۶۵۰ میلی‌متر و برای دوره آتی بر اساس سناریوهای اقلیمی RCP4.6 و RCP8.5 به ترتیب ۵۹۷ و ۵۸۳ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نتایج، پراکندگی داده‌های بارش در منطقه در ماه‌های مرطوب سال (اکتبر-مارس) نسبت به ماه‌های خشک سال (آوریل-سپتامبر) بیشتر است. به دلیل تغییرپذیری زیاد بارش در ماه‌های مختلف، تغییر میانگین بارش ماهانه در دوره آتی نسبت به دوره تاریخی متفاوت است و روند تغییرات میانگین بارش ماهانه بر اساس سناریوهای اقلیمی RCP4.6 و RCP8.5 نسبت به دوره تاریخی به جز در ماه‌های جولای، آگوست و سپتامبر مشابه است. به‌طور کلی طی ماه‌های خشک سال، میانگین بارش در دوره آتی در سناریوهای RCP4.6 و RCP8.5 نسبت به دوره تاریخی به ترتیب ۲۰ و ۱۶ میلی‌متر افزایش و در طی ماه‌های مرطوب نیز به ترتیب ۳۳ و ۴۳ میلی‌متر کاهش خواهد یافت.

شکل ۴ میانگین سالانه رواناب در سقف‌های ۲۰۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ متر مربع در دوره تاریخی (۲۰۲۰-۲۰۰۰) و دوره آتی (۲۰۴۷-۲۰۲۲) بر اساس سناریوهای RCP4.6 و RCP8.5 را نشان می‌دهد. با توجه به کاهش میزان بارش سالانه منطقه در دوره‌های آتی نسبت به دوره تاریخی، مقدار رواناب بر اساس سناریوی اقلیمی RCP4.6 در سقف‌های ۲۰۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ مترمربع ۷ درصد و در صورت وقوع سناریوی اقلیمی RCP8.5، ۱۱ درصد کاهش می‌یابد. بی‌تردید، در سامانه‌های برداشت آب باران هرچه مساحت سقف بزرگتر باشد، میزان رواناب جمع‌آوری شده بیشتر خواهد بود. تغییرات رواناب در دوره آتی در سناریوهای RCP4.6 و RCP8.5 حدود ۲/۵ درصد است که بنظر می‌رسد تأثیر داده‌های مدل GFDL-CM3 در سناریوهای خوشبینانه (RCP4.6) و بدبینانه (RCP8.5) بر رواناب در منطقه به هم نزدیک

$$R_v(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{365} UW_i}{\sum_{i=1}^{365} D_i} \times 100 \quad (7)$$

$$R_t(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{365} \text{count}(MWS_i = 0)}{\sum_{i=1}^{365} \text{count}(MWS_i \geq 0)} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، MWS_i حجم آب شرب بسته‌بندی تامین شده از سایر بازار در روز i ام می‌باشد.

۴-۲- ارزیابی مالی

ارزیابی مالی شامل آنالیز هزینه‌های ثابت و متغیر یک پروژه می‌باشد که به سرمایه‌گذاران در ارتباط با توجیه مالی پروژه آگاهی می‌بخشد (Severis et al., 2019). از این‌رو، سه شاخص پرکاربرد شامل نسبت سود به هزینه (Brooks et al., 2012)، ارزش فعلی خالص (Brooks et al., 2012) و نرخ بازده داخلی (Yuan et al., 2012) برای انتخاب اندازه مخزن مناسب استفاده شد (روابط ۹ تا ۱۱). براساس این شاخص‌ها، پروژه‌ای از نظر مالی توجیه‌پذیر است که، مقدار نسبت (B/C) بیش‌تر از یک، مقدار NPV مثبت و مقدار IRR بیشتر از حداقل نرخ بهره مورد انتظار باشد. بر اساس گزارش بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، حداقل نرخ بهره مورد انتظار برای سال ۱۴۰۱، ۲۰ درصد می‌باشد.

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (9)$$

$$NPV = \left(\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \right) - C_0 \quad (10)$$

$$NPV = \left(\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+IRR)^t} \right) - C_0 = 0 \quad (11)$$

که در آن، B_t ، سود ناخالص در سال t ، C_t ، هزینه در سال t ، C_0 ، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، r ، نرخ تنزیل، IRR ، نرخ بازده داخلی و n ، طول عمر پروژه می‌باشد.

کلیه هزینه‌ها شامل خرید تجهیزات (مخزن، پمپ، سیفون اولیه، واحد تصفیه) بصورت تفکیک شده و متناسب با ظرفیت از بازار استعلام شد. دستمزد اجرا سامانه نیز معادل ۱۰ درصد هزینه‌های خرید و هزینه تجهیزات بسته‌بندی و توزیع آب نیز بر اساس تجارب موجود در ایران، معادل ۷۰ درصد درآمدهای سالانه در نظر گرفته شد. هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه سامانه مطابق استانداردها و راهنمایی‌های ارزیابی طرح‌های آبی معادل ۰/۶ درصد هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه در نظر گرفته شد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و جاری سامانه استحصال آب باران برای ظرفیت تصفیه ۴/۵ متر مکعب

در مدل YBS بیشتر از مدل YAS است و با افزایش حجم مخزن ذخیره، اختلاف قابلیت اطمینان دو مدل کم خواهد شد.

است. از این رو برای بررسی کارایی سامانه‌های برداشت آب باران در دوره آبی از سناریو RCP4.6 استفاده شد.

۳-۲- انتخاب مدل بیلان مناسب

همچنین بنظر می‌رسد در یک سطح آبیگر کوچکتر، بدلیل رواناب پایین (ورودی کمتر) به سامانه حساسیت دو مدل YBS و YAS در تولید آب نسبت به تغییرات اندازه مخزن ذخیره‌سازی به یک اندازه است به‌طوری‌که در این دو مدل قابلیت اطمینان حجمی و زمانی، در سطح آبیگر ۲۰۰ متر مربع در اندازه مخازن مختلف نزدیک به هم برآورد شده است. در حالیکه، در مساحت‌های بزرگتر و در نتیجه آن افزایش رواناب ورودی سامانه، مدل YBS حساسیت بالاتری نسبت به مدل YAS نشان می‌دهد و این دو مدل قابلیت اطمینان سامانه را با اختلاف بیشتری برآورد می‌کنند.

با توجه به داده‌های روزانه بارش تاریخی و براساس الگوریتم‌های YBS و YAS، بیلان روزانه آب محاسبه شد. شکل ۴ میزان اختلاف در قابلیت اطمینان زمانی (شکل 4-a) و حجمی (شکل 4-b) سامانه‌های استحصال آب باران را در الگوریتم‌های YBS و YAS در اندازه مخازن مختلف و ظرفیت تصفیه برابر با نیاز روزانه آب بسته‌بندی دانشگاه نشان می‌دهد. مقایسه خروجی دو مدل در شرایط یکسان از تصفیه روزانه، نشان می‌دهد که قابلیت‌های اطمینان زمانی و حجمی

Table 1- The cost of initial investment and current costs estimated for the implementation of rainwater harvesting system for the treatment capacity of 4.5 m³.day⁻¹ (million Rials)

جدول ۱- هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و جاری سامانه استحصال آب باران برای ظرفیت تصفیه ۴/۵ مترمکعب در روز (میلیون ریال)

Roof size m ²	Tank size m ³	Initial investment costs						Current costs		
		Tank	Pump*	Treatment	First flush	Implementation	Total	Packaging	O&M	Total
200	5	120.0	30.0	400.0	40.0	59.0	649.0	716.8	4	720.7
200	8	197.0	30.0	400.0	40.0	66.7	733.7	788.6	4	793.0
200	12	298.0	30.0	400.0	40.0	76.8	844.8	827.0	5	832.1
200	20	464.3	30.0	400.0	40.0	93.4	1027.7	835.4	6	841.5
200	30	707.9	30.0	400.0	40.0	117.8	1295.7	835.7	8	843.5
200	40	928.5	30.0	400.0	40.0	139.9	1538.4	835.7	9	844.9
200	50	1176.9	30.0	400.0	40.0	164.7	1811.6	835.7	11	846.6
850	5	120.0	30.0	400.0	170.0	72.0	792.0	1407.2	5	1412.0
850	8	197.0	30.0	400.0	170.0	79.7	876.7	1875.2	5	1880.5
850	12	298.0	30.0	400.0	170.0	89.8	987.8	2307.8	6	2313.7
850	20	464.3	30.0	400.0	170.0	106.4	1170.7	2817.3	7	2824.3
850	30	707.9	30.0	400.0	170.0	130.8	1438.7	3132.2	9	3140.8
850	40	928.5	30.0	400.0	170.0	152.9	1681.4	3296.5	10	3306.5
850	50	1176.9	30.0	400.0	170.0	177.7	1954.6	3401.6	12	3413.3
1700	5	120.0	30.0	400.0	340.0	89.0	979.0	1635.2	6	1641.0
1700	8	197.0	30.0	400.0	340.0	96.7	1063.7	2270.7	6	2277.1
1700	12	298.0	30.0	400.0	340.0	106.8	1174.8	2926.1	7	2933.2
1700	20	464.3	30.0	400.0	340.0	123.4	1357.7	3857.4	8	3865.6
1700	30	707.9	30.0	400.0	340.0	147.8	1625.7	4616.6	10	4626.3
1700	40	928.5	30.0	400.0	340.0	169.9	1868.4	5112.9	11	5124.1
1700	50	1176.9	30.0	400.0	340.0	194.7	2141.6	5471.9	13	5484.8

* با توجه به ثابت بودن ظرفیت تصفیه و فشار مورد نیاز پمپ، برای تمامی سناریوهای از یک پمپ استفاده شد.

* Considering similar treatment capacity and required pumping pressure, same pump is considered for all scenarios.

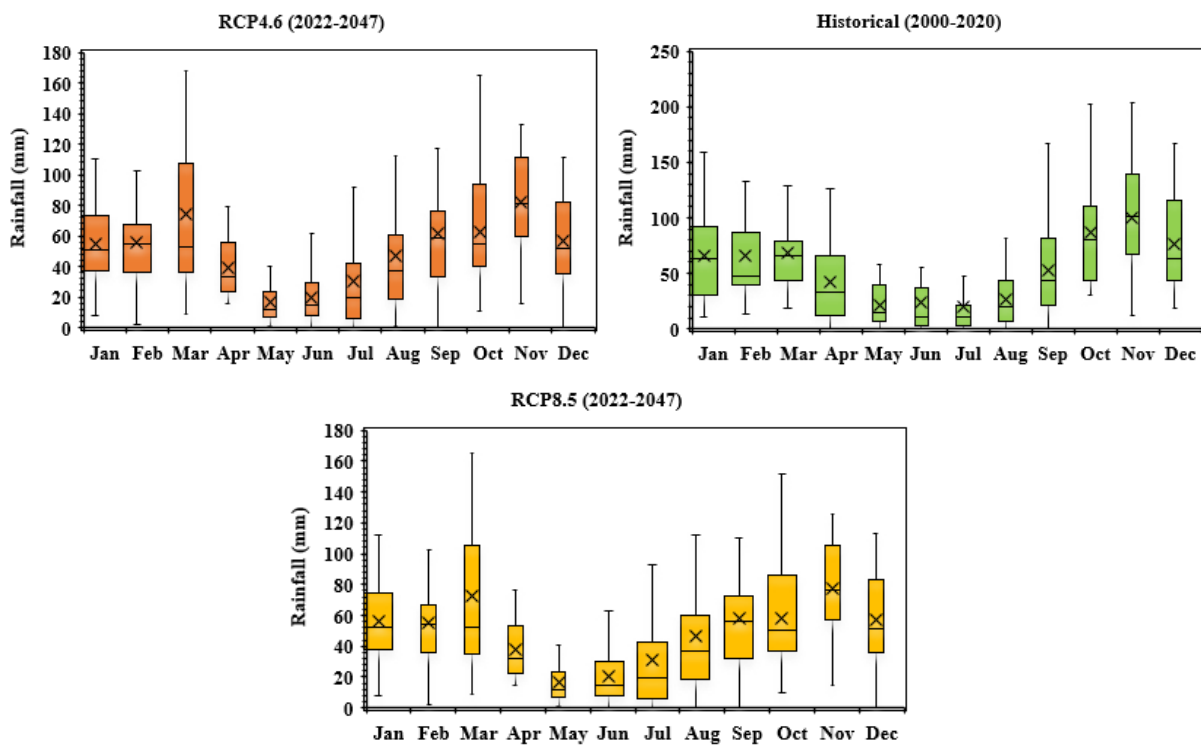


Fig. 3- Average monthly rainfall in the historical period and the future period under RCP4.6 and RCP8.5 climate scenarios

شکل ۳- میانگین بارندگی ماهانه در دوره تاریخی و دوره آتی بر اساس سناریوهای اقلیمی RCP8.5 و RCP4.6

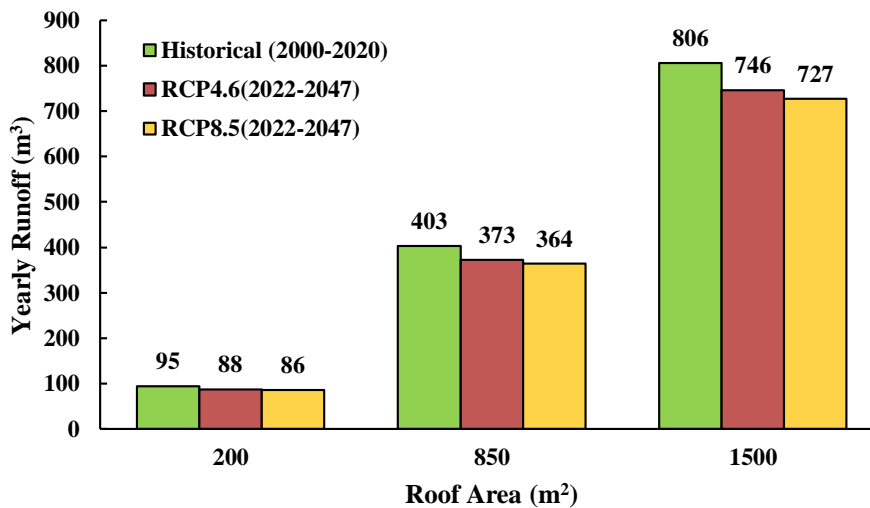


Fig. 4- Annual average of runoff from 200, 850 and 1500 m² roofs in the past and future period under RCP4.6 and RCP8.5 climate scenarios

شکل ۴- میانگین سالانه رواناب ناشی از سقف‌های ۲۰۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ متر مربع در دوره تاریخی و دوره آتی بر اساس

سناریوهای اقلیمی RCP8.5 و RCP4.6

بنابراین در تمامی حالات، قابلیت‌های زمانی و حجمی در مدل YBS بیشتر از مدل YAS می‌باشد که نشان از تولید حجم آب آشامیدنی بالاتر در تعداد روزهای بیشتر سال، در شرایط یکسان رواناب و حجم مخزن روزانه برابر دارد. در پژوهش‌های پیشین (Islam et al., 2021; Liaw and Tsai, 2004; Fewkes and Butler, 2000; Islam et al., 2010) نیز نتایج مشابه بدست آمد. از آنجایی که مدل YAS دارای الگوریتم سختگیرانه‌تری در تولید آب می‌باشد (Fewkes and Butler, 2000)، در ادامه به منظور بررسی و انتخاب ظرفیت حجم ذخیره‌سازی و تصفیه روزانه مناسب در دوره آبی، از خروجی این مدل استفاده شد.

۳-۳- قابلیت اطمینان

- اثر تغییر اقلیم

شکل ۶ تغییرات R_v (a) و R_t (b) برای سامانه‌ای با ظرفیت تصفیه روزانه برابر با نیاز روزانه آب بسته‌بندی در دوره تاریخی و دوره آبی را نشان می‌دهد. بنظر می‌رسد، اثر تغییر اقلیم بر میزان قابلیت اطمینان زمانی و حجمی سامانه ناچیز می‌باشد. دلیل این مهم کاهش حدود ۷ درصدی رواناب ناشی از اثر سناریوی RCP4.6 نسبت به دوره پایه می‌باشد. بنابراین، تغییر اقلیم طی ۲۵ سال آینده تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سامانه‌های RWH ندارد و قابلیت اطمینان حجمی و زمانی در دوره تاریخی و آبی بر هم منطبق هستند.

- اثر ظرفیت تصفیه روزانه

بی تردید برای سوددهی سامانه‌های استحصال آب باران، بالا بودن عملکرد (راندمان) سامانه و به تبع آن تولید آب آشامیدنی بیشتر مورد توجه می‌باشد. شکل ۷، اثر ظرفیت تصفیه روزانه بر قابلیت اطمینان زمانی و حجمی سامانه در سطوح مختلف آبیگر در دوره آبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات ظرفیت تصفیه روزانه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت اطمینان حجمی (R_v) ندارد. عبارتی با افزایش ظرفیت تصفیه روزانه، حجم آب تولیدی بسته‌بندی در طی سال افزایش نمی‌یابد. یافته‌ها نشان می‌دهد، با افزایش ظرفیت تصفیه روزانه از ۳/۵ به ۵ مترمکعب، قابلیت اطمینان زمانی (R_t) در سطوح آبیگر ۲۰، ۸۵۰ و ۱۷۰۰ مترمربع به ترتیب ۱، ۱۱ و ۲۱ درصد افزایش می‌یابد ولی ادامه افزایش ظرفیت تصفیه روزانه، باعث بهبود مقادیر R_t نخواهد شد (شکل ۷-a). به عبارتی با توجه به میزان رواناب تولیدی در سطوح آبیگر مورد تحقیق و میزان آب مورد نیاز شرب بسته‌بندی روزانه، حداکثر ظرفیت تصفیه روزانه (ظرفیت اسمی) ۵ متر مکعب

می‌باشد و انتخاب ظرفیت بالاتر برای تصفیه، باعث بهبود شاخص‌های عملکرد سامانه نخواهد شد. مقادیر شاخص قابلیت اطمینان حجمی حداکثر نیاز آب شرب بسته‌بندی روزانه (R_{v_WD}) در دانشگاه (۴/۵ متر مکعب) و حداکثر ظرفیت تصفیه روزانه (R_{v_5}) با افزایش حجم مخزن ذخیره در سطوح مختلف آبیگر محاسبه و نتایج در شکل ۷-b آمده است.

بطور کلی، با نصب واحد تصفیه با حداکثر ظرفیت اسمی، مقدار بهبود شاخص قابلیت اطمینان برای سطوح آبیگر ۲۰۰ و ۸۵۰ متر مربع ناچیز است ولی برای سطح آبیگر ۱۷۰۰ مترمربع، با نصب مخزن ذخیره ۵ الی ۵۰ متر مکعب، بهبود ۰/۸ الی ۵ درصدی در این شاخص حاصل خواهد شد. بنابراین، اگرچه نصب واحد تصفیه با ظرفیت اسمی تا حدودی باعث تغییر قابلیت اطمینان حجمی خواهد شد، ولی بدلیل تأثیر کم آن، نصب واحد تصفیه به منظور تأمین حداکثر نیاز آب شرب بسته‌بندی با ظرفیت ۴/۵ متر مکعب در روز انتخاب شد.

- اثر حجم مخزن

در صورت نصب واحد تصفیه منتخب، حجم تولید سالانه آب شرب بسته‌بندی و تغییرات مقادیر قابلیت اطمینان زمانی و حجمی در دوره آبی در شکل ۸ نشان داده شد. بطور کلی با افزایش ظرفیت مخازن ذخیره‌سازی، حجم آب شرب تولیدی و مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد. به‌طور معمول مقدار قابلیت اطمینان زمانی از (Islam et al., 2021; Karim et al., 2015).

بدیهی است این روند برای سطوح مختلف آبیگر متفاوت است بطوری که برای سطح آبیگر ۲۰۰ متر مربع، بدلیل بالا بودن نیاز روزانه آب شرب، همزمانی مصرف آن با تولید و محدود بودن حجم رواناب حاصل از بارندگی، افزایش حجم مخزن ذخیره‌سازی از ۵ به ۲۰ متر مکعب، باعث افزایش ۱۶ درصد حجم آب شرب تولیدی و یک درصد شاخص‌های گفته شده خواهد شد.

این درحالی است که افزایش بیشتر حجم مخزن برای این سطح آبیگر، تأثیری بر مقادیر پارامترهای فوق ندارد. برای سطح آبیگر ۸۵۰ متر مربع، با افزایش حجم مخزن ذخیره‌سازی از ۵ به ۵۰ مترمکعب، حجم آب شرب تولیدی سالانه از حدود ۱۴۸ به ۳۵۷ مترمکعب افزایش یافته و مقادیر قابلیت اطمینان زمانی و مکانی نیز به ترتیب ۱۸ و ۱۹ درصد بهبود می‌یابد.

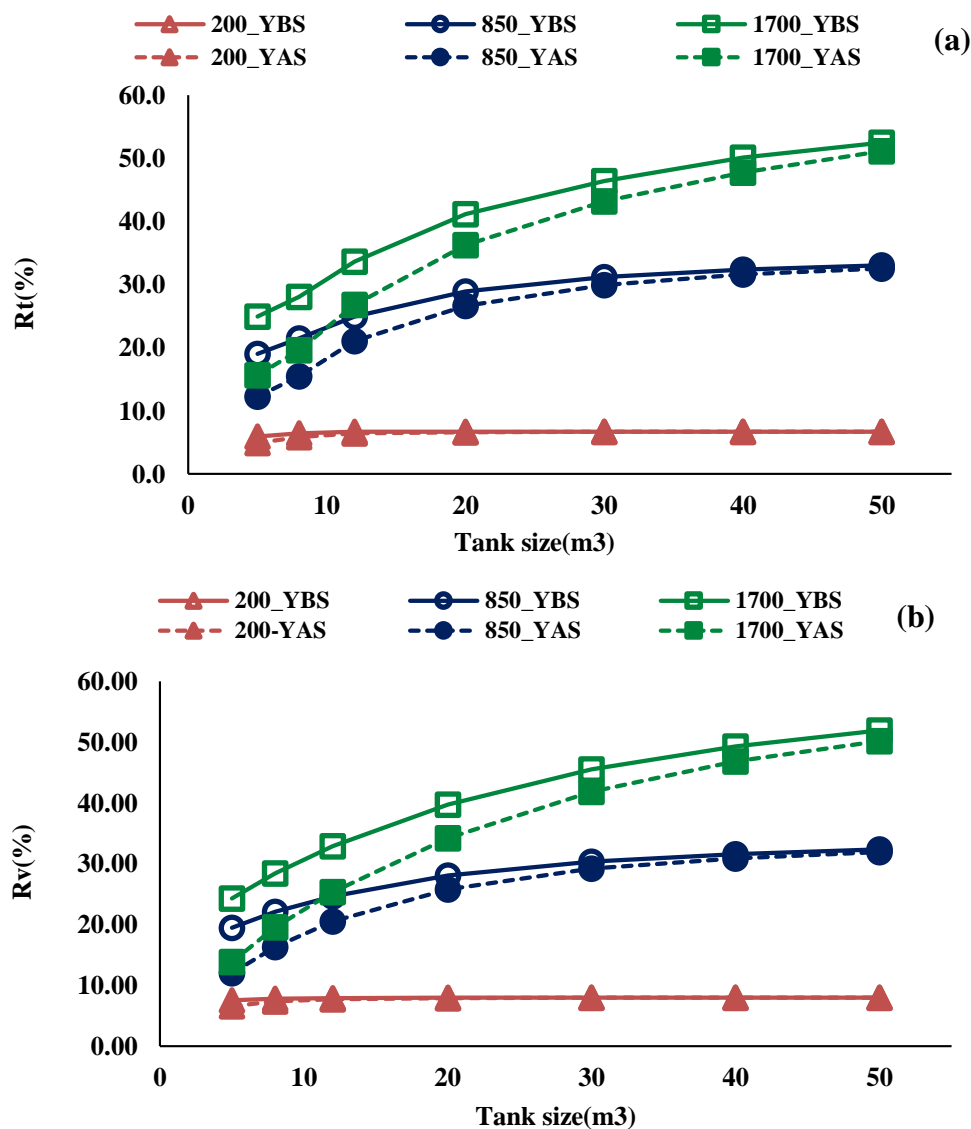


Fig. 5- Time (a) and volumetric (b) reliability curves of the RWH system in different tank size using YBS and (2000-2020) YAS algorithms at different Catchment area levels in the historical period

شکل ۵- مقادیر قابلیت اطمینان زمانی (a) و حجمی (b) سامانه RWH با حجم ذخیره مختلف با استفاده از الگوریتم‌های YBS و YAS در سطوح مختلف آبیگر در دوره تاریخی (۲۰۲۰-۲۰۰۰)

یافته‌ها نشان می‌دهند در سطوح آبیگر ۸۵۰ و ۱۷۰۰ مترمربع، اثر حجم مخزن بر قابلیت اطمینان حجمی و زمانی با نسبت یکسان می‌باشد و افزایش حجم مخزن موجب بهبود قابلیت اطمینان حجمی و زمانی در سامانه‌های استحصال آب باران می‌شود که با پژوهش‌های Karim et al. (2015)، Islam et al. (2021) و Alim et al. (2020) همخوانی دارد.

همچنین برای سطح آبیگر ۱۷۰۰ متر مربع، با افزایش حجم مخزن ذخیره‌سازی از ۵ به ۵۰ مترمکعب، حجم آب شرب تولیدی سالانه از حدود ۱۷۲ به ۵۷۵ مترمکعب افزایش یافته و مقادیر قابلیت اطمینان زمانی و مکانی نیز به ترتیب ۲۹۵ و ۳۳۵ درصد بهبود می‌یابد.

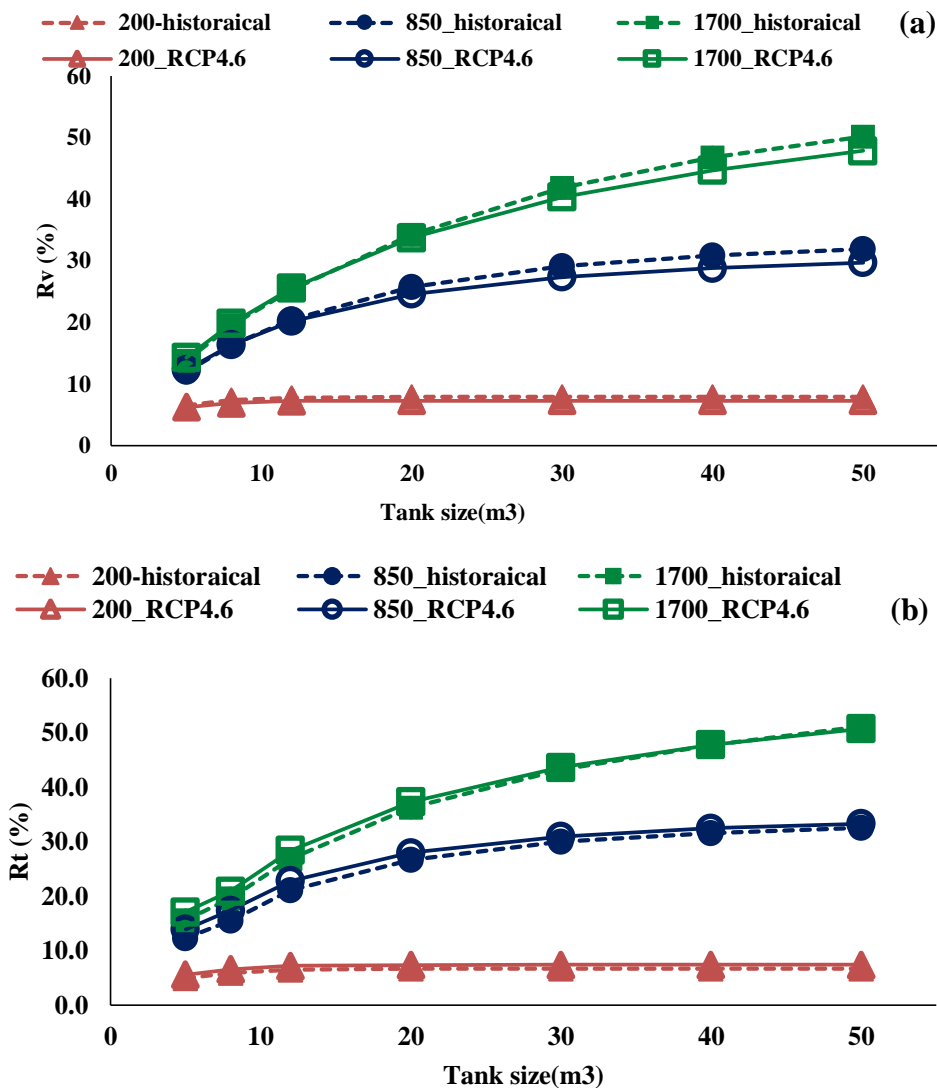


Fig. 6- The effect of climate change on Rv (a) and Rt (b) when meeting the maximum daily requirement of packaged drinking water through storage in different tank sizes and different catchment surface sizes
 شکل ۶- اثر تغییر اقلیم بر مقادیر (a) Rv و (b) Rt در صورت تأمین حداکثر نیاز روزانه آب شرب بسته‌بندی از طریق ذخیره‌سازی در احجام مختلف مخزن و اندازه متفاوت سطح آبرگیر

۳-۴- ارزیابی مالی

باستناد هزینه سناریوهای مختلف و در نظر داشتن مبانی مالی، مقادیر شاخص‌های مالی شامل نسبت سود به هزینه، ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی (IRR) در سطوح مختلف آبرگیر در جدول ۲ آمده است. یافته‌ها نشان می‌دهد با افزایش سطح آبرگیر و به تبع آن انتخاب مخزن ذخیره با حجم بیشتر، حجم آب بسته‌بندی تولیدی افزایش یافته و شاخص‌های سه‌گانه برای سرمایه‌گذاری جذابیت بیشتری به همراه دارد.

یافته‌ها نشان می‌دهد اگرچه افزایش حجم مخازن ذخیره‌سازی در گام‌های اولیه باعث بهبود مقادیر شاخص قابلیت اطمینان مکانی و زمانی می‌شود؛ اما با اضافه شدن حجم مخازن، شیب تغییرات شاخص‌ها نزولی خواهد شد. دلیل این اتفاق تأثیرگذاری توامان مقادیر رواناب ورودی (ارتفاع بارش و سطح آبرگیر) و همزمانی مصرف در مدل بیلان است.

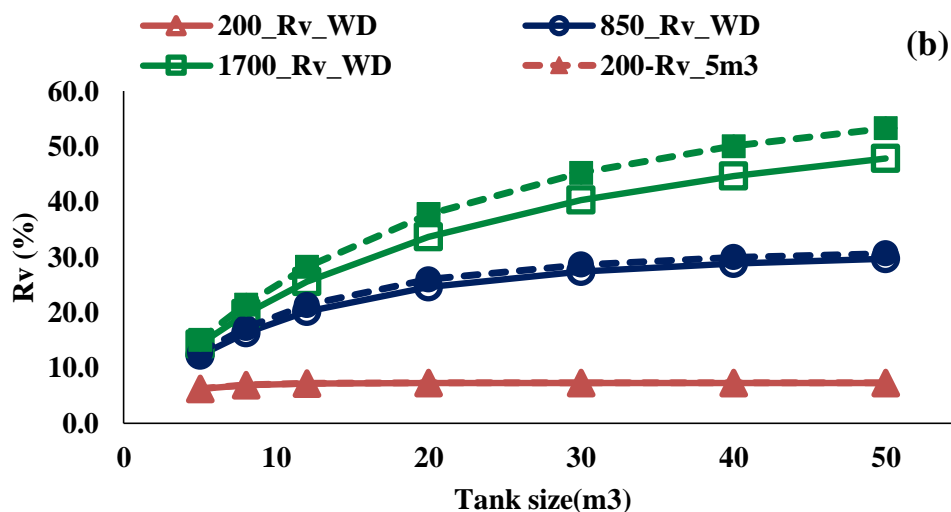
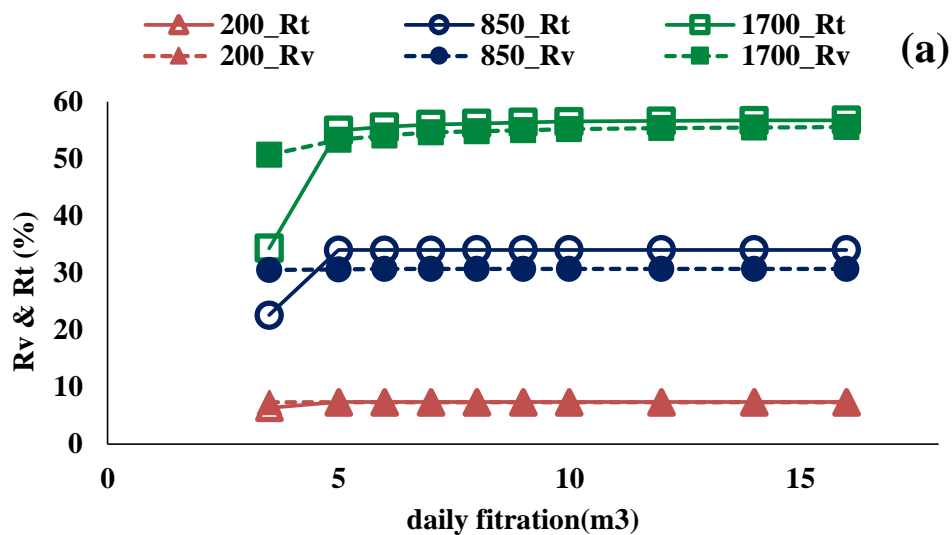


Fig. 7- Changes of Rv and Rt for different daily treatment capacities at different levels of the catchment (a) and Rv values in the maximum daily requirement of packaged drinking water (Rv_WD) and the maximum daily treatment capacity (Rv_5m3) with different tank sizes and different levels of the catchments (b)
 شکل ۷- تغییرات Rv و Rt با ظرفیت‌های مختلف تصفیه روزانه در سطوح مختلف آبخیز (a) و مقادیر Rv در حداکثر نیاز شرب بسته‌بندی روزانه (Rv_WD) و حداکثر ظرفیت تصفیه روزانه (Rv_5m3) با اندازه مخازن مختلف در سطوح مختلف آبخیز (b)

مقدار حداقل قابل انتظار (۲۰ درصد) بیشتر خواهد بود. این سامانه به ترتیب دارای قابلیت اطمینان زمانی و حجمی ۶/۶ و ۶/۹ درصد می‌باشد. دلیل پایین بودن مقادیر شاخص‌های اخیر، سطح کم آبخیز و مصرف بالای آب در مجموعه دانشگاه می‌باشد.

نتایج نشان داد، مناسب‌ترین حجم مخزن برای ذخیره‌سازی آب در سطح آبخیز ۲۰۰ متر مربع، معادل ۸ مترمکعب می‌باشد که با نصب این مخزن و واحد تصفیه با ظرفیت ۴/۵ متر مکعب در روز، امکان تولید سالانه ۸۳ مترمکعب آب شرب بسته‌بندی مورد نیاز دانشگاه وجود دارد. در این صورت ارزش خالص فعلی و نسبت سود به هزینه به ترتیب ۹۱۷ میلیون ریال و ۱/۲ خواهد بود و میزان نرخ داخلی نیز از

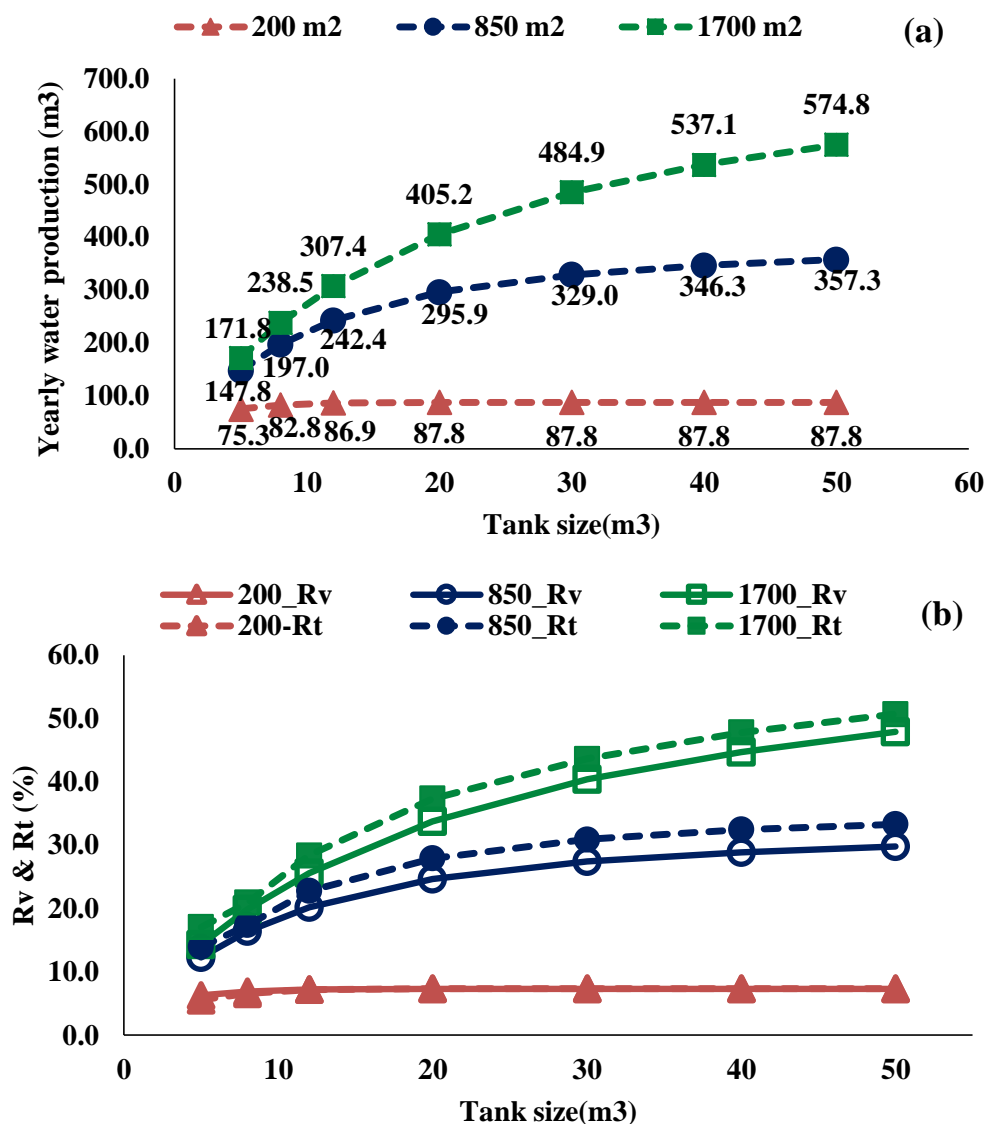


Fig. 8- The annual volume of produced drinking water (a) and Rb and Rt index values (b) with the installation of the selected treatment unit and using different storage volumes

شکل ۸- حجم سالانه آب شرب تولیدی (a) و مقادیر شاخص Rv و Rt (b) با نصب واحد تصفیه منتخب و با بکارگیری احجام مختلف ذخیره‌سازی

مقدار نسبت سود به هزینه و تأثیر ناچیز بر مقادیر قابلیت اطمینان، از انتخاب این مخازن صرف‌نظر شد. یافته‌ها نشان می‌دهد، در صورت استفاده از سطح آبگیر ۱۷۰۰ متر مربع برای استحصال آب باران، نصب مخزن ذخیره با حجم ۴۰ متر مکعب، امکان تولید سالانه ۵۳۷ متر مکعب آب شرب بسته‌بندی فراهم خواهد شد. در این صورت ارزش فعلی خالص و نسبت سود به هزینه به ترتیب ۸۹۱۸ میلیون ریال و ۱/۳۳ خواهد شد که از نگاه بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران میزان نرخ داخلی این سامانه حدود شش برابر حداقل نرخ بهره داخلی

مناسب‌ترین مخزن ذخیره‌سازی آب برای سطح آبگیر ۸۵۰ مترمربع، مخزنی با حجم ۲۰ متر مکعب است؛ زیرا در صورت نصب این مخزن و واحد تصفیه منتخب، مقدار شاخص ارزش خالص فعلی و نسبت سود به هزینه به ترتیب ۴۷۶۸ میلیون ریال و ۱/۳۱ خواهد بود. در این صورت این سامانه قادر است سالانه به ترتیب با قابلیت اطمینان زمانی و حجمی ۲۷/۹ و ۲۴/۶ درصد آب شرب بسته‌بندی مورد نیاز دانشگاه را تأمین نماید. اگرچه نتایج جدول ۲ امکان انتخاب مخزن با ظرفیت بیشتر (۳۰ و ۴۰ مترمکعب) را مقدور می‌سازد ولی با توجه به کاهش

مورد انتظار در سال ۱۴۰۱ است. در صورت عملیاتی شدن، این سامانه قادر است به ترتیب با قابلیت اطمینان زمانی و مکانی ۴۷/۸ و ۴۴/۷ درصد نیاز آب شرب بسته‌بندی دانشگاه را تأمین نماید.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

امکان‌سنجی فنی و مالی اجرای سامانه‌های استحصال آب باران با هدف تولید آب شرب بسته‌بندی مورد نیاز دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری از طریق سه سطح شیروانی بررسی شد. به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر ابعاد فنی این سامانه، مقدار بارش در دوره آتی پیش‌بینی و پس از تعیین مقادیر رواناب سطوح آبیگیر، مدل بیلان روزانه انتخاب و شاخص قابلیت اطمینان زمانی و حجمی محاسبه شد. در گام بعدی لیست تجهیزات مورد نیاز برای تولید آب شرب بسته‌بندی در سناریوهای مختلف حجم مخازن اولیه ذخیره و ظرفیت تصفیه روزانه استخراج و جدول جریان نقدینگی به منظور استخراج شاخص سه‌گانه ارزیابی مالی تشکیل شد.

بطورکلی نتایج نشان می‌دهد در صورت افزایش سطح شیروانی، شاخص قابلیت زمانی و حجمی افزایش خواهد یافت. همچنین، استفاده از سامانه با یک سطح آبیگیر، در صورت افزایش حجم ذخیره‌سازی، در گام‌های اولیه شیب تغییرات مقادیر قابلیت اطمینان زمانی و حجمی صعودی است ولی با افزایش امکان ذخیره‌سازی، مقدار این شیب نزولی

خواهد شد. به‌طورکلی اجرای این سامانه، خصوصاً در مناطق با بارندگی نسبتاً مناسب، ضمن تأمین بخشی از نیاز آب شرب، ارزش افزوده اقتصادی برای کشور را به همراه دارد. استحصال آب باران با رویکرد مورد بررسی در این تحقیق، یکی از راهکارهای مدیریت بر منابع آب در راستای مدیریت سبز بوده که تأثیر ویژه‌ای بر کاهش تنش آبی کشور دارد.

۵- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با شماره قرارداد ۰۴-۱۳۹۹-۰۲ انجام شد و نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری این دانشگاه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Rain Water Harvesting (RWH)
- 2- National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
- 3- Yield-After-Spillage (YAS)
- 4- Yield-Before-Spillage (YBS)
- 5- Volumetric Reliability (Rv)
- 6- Time Reliability (Rt)
- 7- Benefit-Cost Ratio ((B-C) Ratio)
- 8- Net Present Value (NPV)
- 9- Internal Rate of Return (IRR)

Table 2- Benefit-cost ratios, Net Present Value and Internal Rate of Return for different catchment areas and tank sizes

جدول ۲- نسبت سود به هزینه، ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی برای سطوح مختلف آبیگیر و حجم مختلف مخازن

Tank size (m ³)	catchment area (m ²)								
	200			850			1700		
	B/C (-)	NPV (mRls.)	IRR (%)	B/C (-)	NPV (mRls.)	IRR (%)	B/C (-)	NPV (mRls.)	IRR (%)
5	1.20	852	47	1.28	2168	76	1.27	2459	71
8	1.20	917	45	1.30	3073	91	1.30	3719	91
12	1.18	884	41	1.31	3876	100	1.32	4995	106
20	1.14	713	34	1.31	4768	103	1.33	6781	121
30	1.08	438	27	1.30	5160	93	1.33	8115	121
40	1.03	188	23	1.29	5259	83	1.33	8918	117
50	0.98	-93	19	1.28	5200	74	1.32	9397	109

- Abas P E & Mahlia T M I (2019) Techno-economic and sensitivity analysis of rainwater harvesting system as alternative water source. *Sustainability* 11(8):2365
- Aladenola O O & Adeboye O B (2010) Assessing the potential for rainwater harvesting. *Water Resources Management* 24(10):2129-2137
- 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
- Arnell N W (1999) Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9:S31-S49
- Barthwal S, Chandola-Barthwal S, Goyal H, Nirmani B, & Awasthi B (2014) Socio-economic acceptance of rooftop rainwater harvesting- A case study. *Urban Water Journal* 11(3):231-239
- Basinger M, Montalto F, & Lall U (2010) A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology* 392(3-4):105-118
- Brooks K N, Ffolliott P F, & Magner J A (2012) Hydrology and the management of watersheds. John Wiley & Sons
- Chen Y & Xu Z (2005) Plausible impact of global climate change on water resources in the Tarim River Basin. *Science in China Series D: Earth Sciences* 48(1):65-73
- Elmahdi A, ElGafy I, & Kheireldin K (2009) Global warming-water shortage and food security future planning interaction: System analysis approach (WBFSM) WRM-2009. *Water Resource Management, Malta* 9-11
- Fang C L, Bao C, & Huang J C (2007) Management implications to water resources constraint force on socio-economic system in rapid urbanization: A case study of the Hexi Corridor, NW China. *Water Resources Management* 21(9):1613-1633
- Fengtai G & Xiaochao M (2012) Study on rainwater utilization engineering mode in northern cities of China. *Procedia Engineering* 28:453-457
- Fewkes A & Butler D (2000) Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models. *Building Services Engineering Research and Technology* 21(2):99-106
- GhaffarianHoseini A, Tookey J, GhaffarianHoseini A, Yusoff S M, & Hassan N B (2016) State of the art of rainwater harvesting systems towards promoting green built environments: a review. *Desalination and Water Treatment* 57(1):95-104
- Ghisi E & Ferreira D F (2007) Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment* 42(7):2512-2522
- Gholami M A & Bagheri Khalili Z (2022) Quantity and quality assessment of rainwater extracted from the roof for drinking water. *Water and Irrigation Management* 12(3):659-673 (In Persian)
- Haq S A (2017) Harvesting rainwater from buildings. Springer International Publishing Switzerland
- Haque M M, Rahman A, Hagare D, & Kibria G (2013) Principal component regression analysis in water demand forecasting: An application to the Blue Mountains, NSW, Australia. *Journal of Hydrology and Environment Research* 1(1):49-59
- Haque M M, Hagare D, Rahman A, & Kibria G (2014) Quantification of water savings due to drought restrictions in water demand forecasting models. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140(11):04014035
- Haque M M, Rahman A, & Samali B (2016) Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production* 137:60-69
- Haque M M, Rahman A, Hagare D, Kibria G, & Karim, F (2015) Estimation of catchment yield and associated uncertainties due to climate change in a mountainous catchment in Australia. *Hydrological Processes* 29(19):4339-4349
- Herrmann T & Schmida U (2000) Rainwater utilisation in Germany: Efficiency dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water* 1(4):307-316
- Imteaz M A, Ahsan A, Naser J, & Rahman A (2011a) Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling* 56(1):80-86
- Imteaz M A, Shanableh A, Rahman A, & Ahsan A (2011b) Optimisation of rainwater tank design from large roofs: a case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation and Recycling* 55(11):1022-1029
- 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

- Islam M M, Chou F F, & Kabir M R (2011) Feasibility and acceptability study of rainwater use to the acute water shortage areas in Dhaka City, Bangladesh. *Natural Hazards* 56(1):93-111
- Jenkins D, Pearson F, Moore E, Kim S J, & Valentine R (1978) Feasibility of rainwater collection systems in California. Water Resources Centre, University of California No. 173
- 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
- Kim Y & Han M (2008) Rainwater storage tank as a remedy for a local urban flood control. *Water Science and Technology: Water Supply* 8(1):31-36
- Kloss C & Lukes R (2008) Green streets: Managing wet weather with green infrastructure municipal handbook. U.S. Environmental Protection Agency, doi: EP A-833-F-08-009
- Kolavani N J & Kolavani N J (2020) Technical feasibility analysis of rainwater harvesting system implementation for domestic use. *Sustainable Cities and Society* 62:102340
- Lange J, Husary S, Gunkel A, Bastian D, & Grodek T (2012) Potentials and limits of urban rainwater harvesting in the Middle East. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(3):715-724
- Liaw C-H & Tsai Y-L (2004) Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic Use. *Journal of the American Water Resources Association* 40:901-912
- Lima C A S, de Souza R S, Kaufmann Almeida A, & Kaufmann de Almeida I (2021) Economic feasibility of a rainwater harvesting system in a residential condominium in the Brazilian Midwest. *International Journal of Sustainable Engineering* 14(6):1950-1961
- Lye D J (2009) Rooftop runoff as a source of contamination: a review. *Science of the total environment* 407(21):5429-5434
- Madani K (2005) Iran's water crisis; inducers, challenges and counter-measures. ERSA 45th Congress of the European Regional Science Association, Amsterdam.
- Madani K, AghaKouchak A, & Mirchi A (2016) Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies* 49(6):997-1016
- Meera V & Mansoor Ahammed M (2018) Factors affecting the quality of roof-harvested rainwater. *Urban Ecology, Water Quality and Climate Change* 195-202
- Palla A, Gnecco I, Lanza L, & La Barbera P (2012) Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resources, Conservation and Recycling* 62:71-80
- Rahimi R & Rahimi M (2018) Spatial and temporal analysis of climate change in the future and comparison of SDSM, LARS-WG and artificial neural network downscaling methods (Case study: Khuzestan Province). *Iranian journal of Ecohydrology* 5(4):1161-1174 (In Persian)
- Rahman A, Keane J, & Imteaz M A (2012) Rainwater harvesting in Greater Sydney: water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling* 61:16-21
- Ren L, Wang M, Li C, & Zhang W (2002) Impacts of human activity on river runoff in the northern area of China. *Journal of Hydrology* 261(1-4):204-217
- Sadoddin A, Bai M, & Naeimi A (2015) Technical and economic feasibility study of rooftop rainwater harvesting system) Case Study: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources). *Journal of Water and Soil Conservation* 21(6):27-50 (In Persian)
- Severis R M, da Silva F A, Wahrlich J, Skoronski E, & Simioni F J (2019) Economic analysis and risk-based assessment of the financial losses of domestic rainwater harvesting systems. *Resources Conservation and Recycling* 146:206-217
- Shahid S, Harun S B, & Katimon A (2012) Changes in diurnal temperature range in Bangladesh during the time period 1961-2008. *Atmospheric Research* 118:260-270
- Steffen J, Jensen M, Pomeroy C A, & Burian S J (2013) Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in US cities. *Journal of the American Water Resources Association* 49(4):810-824
- 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)
- Teston A, Geraldi M S, Colasio B M, & Ghisi E (2018) Rainwater harvesting in buildings in Brazil: A literature review. *Water* 10(4):471

Wallace C D, Bailey R T, & Arabi M (2015) Rainwater catchment system design using simulated future climate data. *Journal of Hydrology* 529:1798-1809

Yuan T, Fengmin L, & Puhai L (2003) Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China. *Agricultural Water Management* 60(3):217-226

Zavala M Á L, Prieto M J C, & Rojas C A R (2018) Rainwater harvesting as an alternative for water supply in regions with high water stress. *Water Supply* 18(6):1946-1955