Research Paper

Reliability, Optimization and Economic Analysis of the Rainwater Harvesting System from the Rooftop

Hadi Shokati[1], **Mahdi Kouchakzadeh**[2*], **Aliakbar Noroozi**[3]

[1] Graduate of Irrigation and Drainage Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Hadi99Shokati@Gmail.Com
[2] Associate Professor of Irrigating and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Kouchakm@Modares.ac.ir
[3] Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: Noroozi.aa@Gmail.Com

10.22125/IWE.2022.162640

Received:
November.08.2020
Accepted:
April.22.2021
Available online:
December 11, 2022

Keywords:
Economic Analysis, Genetic Algorithm, Net Present Value, Optimization, Reliability

Abstract

Performance assessing and economic analysis of rainwater harvesting systems, which is one of the most effective methods to deal with the crisis of water scarcity, will lead to better management of these systems. The purpose of this study was to evaluate the performance of rainwater harvesting systems, Musanejad dormitory and sports club buildings in Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture were selected as study areas. Then, the 22 years old daily precipitation data of the Chitgar Weather Station was prepared. System simulation was performed in Matlab software and reliability and overflow ratio of storage tanks were determined. The Genetic Algorithm was used to determine the optimal volume of the tanks of both buildings and finally, an economic analysis of these systems was carried out using the Net Present Value method and benefit-cost ratio. The results showed that the optimum volume of tanks for the Sports Club and Musanejad dormitory was 2,415 and 1 cubic meters, respectively. These tanks can store up to 82 and 120 cubic meters of water per year, respectively. The results also showed that the performance of rainwater harvesting systems was beneficial for the Musanejad dormitory but had no economic justification for the sports club due to low demand and high overflow.

* **Corresponding Author: Mahdi Kouchakzadeh**
Address: Associate Professor of Irrigating and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
Email: Kouchakm@Modares.ac.ir
Tel: +982148292600

1. Introduction

Water supply in Iran has become an important problem due to climate diversity, over-extraction of groundwater and rapid population growth. One of the management strategies to reduce the pressure on water resources is the use of rainwater harvesting systems which can be used to meet some of the non-potable water demands. Economic analysis of these systems plays an important role in convincing users to adopt a rainwater harvesting system. In recent years, rainwater harvesting as one of the most important alternative sources of water has received more attention and various researches in this field have been conducted in different parts of the world. Mehrabadi et al. (2013) showed that at least 75% of the non-potable water demands of ordinary buildings can be met in approximately 70% of rainwater storage time. Rahman et al. (2014) evaluated the performance of rainwater harvesting systems in Dhaka, Bangladesh. The results showed that from a catchment area of 170 m2, 11% of potable water consumption can be saved annually, which can meet the demand of a building with 60 inhabitants for 1.5 months. Lani et al. (2018) compared the economic benefits of the rainwater harvesting system in terms of reliability percentage, net present value, payback period, benefit to cost ratio and return on investment in two small and large buildings in Malaysia. The results showed that the economic benefits of the proposed system are strongly influenced by the tank size and water tariff, so that the rainwater harvesting system for a large building has a better net present value, return on investment, benefit to cost ratio and payback period than the small system, which shows the greater economic benefits of larger systems.

2. Materials and Methods

In this paper, to designing, optimizing and economically analyzing of rainwater harvesting systems from roof surfaces, two buildings located in the Faculty of Agriculture of Tarbiat Modares University were selected as the study sites. Reliability, overflow ratio as well as optimization of the mentioned systems were determined using relationships and equations. Also, the economic analysis of these systems was performed using the Net Present Value Index (NPV) and the Benefit to Cost Ratio and comparing the initial costs and the annual maintenance costs of the system with the annual profit.

3. Results

Tank volume optimization was performed using the Genetic Algorithm. The results showed that the optimal volumes of the tank for the Sports Club and Musanejad dormitory are equal to 2.415 and 1 m3, respectively. These results show that due to the high water demand in the Musanejad dormitory, most of the received runoff is consumed on the same day and the tank is emptied at the end of the day. Therefore, there is no need to install a larger tank to store water for the next day. Therefore, the optimal tank volume in this building is less than in the Sports Club building.

4. Discussion and Conclusion

The economic analysis of the rainwater harvesting system was done by considering the optimal volumes of the tanks and their purchase and installation costs, as well as the income from water storage. Also, the rate of return on investment was considered equal to 12 %. Economic analysis of the tank volumes showed that the implementation of the rainwater harvesting system for the Sports Club has no economic justification, which is due to low demand and consequently high overflow. While the implementation of this system for Musainejad dormitory, despite the smaller surface area of the tank compared to the Sports Club building, is justified because of the high demand for water in this dormitory, which reduces the cost of buying a tank and storing more water.

5. Six important references

1. Bashar, M. Z. I., M. R. Karim and M. A. Imteaz. 2018. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: A comparative study within six major cities of Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling, 133(1): 146-154.

2. Imteaz, M. A., C. Matos and A. Shanableh .2014. Impacts of climatic variability on rainwater tank outcomes for an inland city, Canberra. Hydrology Science and Technology, 4(3): 177-191.

3. Karim, M. R., M. Z. I. Bashar and M. A. Imteaz. 2015. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting in a megacity in Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling, 104(1): 61-67.

4. Lani, N. H. M., A. Syafiuddin, Z. Yusop and M. Z. Bin Mat Amin. 2018. Performance of small and large scales rainwater harvesting systems in commercial buildings under different reliability and future water tariff scenarios. Science of the Total Environment, 636(15): 1171-1179.

5. Mehrabadi, M. H. R., B. Saghafian and F. Fashi. 2013. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. Resources, Conservation and Recycling, 73(1): 86-93.

6. Rahman, S., M. T. R. Khan, S. Akib, N. B. C. Din, S. K. Biswas and S. M. Shirazi. 2014. Sustainability of rainwater harvesting system in terms of water quality. The Scientific World Journal, (2014).

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. شماره پنجاه. زمستان ۱۴۰۱

قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی سامانه استحصال آب باران از پشت‌بام

هادی شوکتی[۱]، مهدی کوچک‌زاده[۲]*، علی‌اکبر نوروزی[۳]

تاریخ ارسال:۱۳۹۹/۰۸/۱۸
تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۰۲/۰۲

مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس

مقاله پژوهشی

چکیده

ارزیابی عملکرد و تحلیل اقتصادی سامانه‌های استحصال آب باران، که یکی از روش‌های مؤثر و کارآمد در زمینه مقابله با بحران کمبود منابع آبی می‌باشد، موجب اعمال مدیریت بهتر در اجرای این سامانه‌ها می‌گردد. در این مقاله با هدف ارزیابی عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران، دو ساختمان خوابگاه موسی نژاد و باشگاه ورزشی در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس به عنوان مکان‌های مورد مطالعه انتخاب شدند. سپس داده‌های ۲۲ ساله بارش روزانه ایستگاه هواشناسی چیتگر تهیه شد. شبیه سازی سامانه در محیط نرم‌افزار متلب صورت گرفته و قابلیت اطمینان و آزمون سرریز مخازن ذخیره‌سازی تعیین شد. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، حجم بهینه مخازن هر دو ساختمان تعیین شده و در نهایت تحلیل اقتصادی سامانه‌های مذکور با شاخص ارزش کنونی خالص و نسبت منفعت- هزینه انجام شد. نتایج نشان داد که حجم بهینه مخازن برای باشگاه ورزشی و خوابگاه موسی‌نژاد به ترتیب برابر با ۲/۴۱۵ و یک مترمکعب می‌باشد که با استفاده از این مخازن می‌توان سالانه به ترتیب ۸۲ و ۱۲۰ مترمکعب آب ذخیره نمود. همچنین نتایج نشان داد که اجرای سامانه‌های استحصال آب باران برای خوابگاه موسی‌نژاد سودآور بوده ولی برای باشگاه ورزشی به دلیل تقاضای کم و درنتیجه سرریز زیاد توجیه اقتصادی ندارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل اقتصادی، ارزش فعلی خالص، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، قابلیت اطمینان

[۱] کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۴۵۷۵۷۳۷۰ آدرس پست الکترونیکی: Hadi99Shokati@Gmail.Com

[۲] دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران (نویسنده مسئول).
تلفن تماس: ۴۸۲۹۲۶۰۰- ۰۲۱ آدرس پست الکترونیکی: Kouchakm@Modares.ac.ir

[۳] دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. تلفن تماس: ۰۹۱۲۳۲۷۷۲۹۳ آدرس پست الکترونیکی: Noroozi.aa@Gmail.Com

مقدمه

تأمین آب در ایران با توجه به تنوع آب و هوا، استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی و رشد سریع جمعیت، به یک معضل مهم تبدیل شده است. یکی از راهکارهای مدیریتی به منظور کاهش فشار بر منابع آب، به کارگیری سامانه‌های استحصال آب باران می‌باشد و می توان از آن برای تأمین بخشی از تقاضای آب غیرشرب استفاده کرد. تجزیه و تحلیل اقتصادی این سامانه‌ها نقش مهمی را در متقاعد کردن کاربران برای اتخاذ یک سامانه استحصال آب باران ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، استحصال آب باران به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع جایگزین آب مورد توجه بیشتری قرار گرفته است که تحقیقات مختلفی در این زمینه در مناطق مختلف دنیا صورت گرفته است. قاسمی و همکاران (۱۳۸۹) راندمان اقتصادی استفاده از مخازن ذخیره آب باران را مورد ارزیابی قرار دادند. سپس تحلیل اقتصادی اجرای سامانه استحصال آب باران به عنوان جایگزین آب لوله‌کشی را با سه قیمت کنونی، بدون یارانه دولتی و آزاد مقایسه کردند. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که با در نظر گرفتن قیمت آزاد آب، اجرای سامانه استحصال آب باران شهرستان آق‌قلا توجیه اقتصادی دارد. طباطبایی یزدی و همکاران (۱۳۸۹) تحقیقی را با هدف تحلیل اقتصادی سامانه‌های استحصال آب باران در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی شهر مشهد انجام دادند. بر اساس یافته‌ها و نتایج ارزیابی اقتصادی و با توجه به فرضیات، نسبت منفعت به هزینه[1]، یک به ۱۴ به دست آمد که نشان‌دهنده اقتصادی بودن پروژه با نرخ پنج درصد سود سالانه است. (Mun and Han.,2012) بیان داشتند که انتخاب حجم بهینه مخزن آب باران، یک عامل مهم برای افزایش کارایی سامانه استحصال آب باران و کوتاه کردن دوره بازپرداخت است. (Mehrabadi et al.,2013) نشان دادند که می‌توان حداقل ۷۵ درصد از نیاز آب غیرشرب ساختمان‌های معمولی را تقریباً در ۷۰ درصد از زمان نگهداری آب باران تأمین کرد. (Rahman et al.,2014) به ارزیابی عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران در شهر داکا بنگلادش پرداختند. نتایج نشان داد که از یک سطح آبگیر ۱۷۰ مترمربعی می‌توان سالانه ۱۱ درصد در مصرف آب شرب صرفه‌جویی کرد که این حجم آب می‌تواند تقاضای یک ساختمان با ۶۰ سکنه را به مدت ۱/۵ ماه تأمین نماید. (Karim et al.,2015) در تحقیقی در شهر داکا بنگلادش، به برآورد قابلیت اطمینان[2](درصدی از روزهای سال که با استفاده از آب باران می‌توان تمام تقاضای آب مصرفی ساکنین را پاسخ داد) دو ساختمان با مساحت سطح آبگیر ۱۴۰ مترمربع و ۲۰۰ مترمربع و در سه دوره خشکسالی، ترسالی و سال متوسط پرداختند. نتایج نشان داد که نسبت منفعت – هزینه در ترسالی بیشتر از یک بوده ولی در خشکسالی کمتر از یک می‌باشد و اجرای طرح توجیه اقتصادی نخواهد داشت. تاران و مهتابی (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی پتانسیل شهر بناب برای استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت استحصال رواناب تمام سطوح شهر می‌توان کل مصارف عمومی، تجاری و صنعتی این شهر را در تمام ماه‌های سال تأمین نمود. (Lani et al.,2018) مزایای اقتصادی سامانه استحصال آب باران را از لحاظ درصد قابلیت اطمینان، ارزش فعلی خالص، دوره بازگشت سرمایه، نسبت منفعت به هزینه و بازده سرمایه‌گذاری در دو ساختمان کوچک و بزرگ در مالزی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مزایای اقتصادی سامانه پیشنهادی به شدت تحت تأثیر اندازه مخزن و تعرفه آب می‌باشد، به طوری که سامانه استحصال آب باران برای ساختمان بزرگ، ارزش فعلی خالص، بازده سرمایه‌گذاری، نسبت منفعت به هزینه و دوره بازگشت سرمایه بهتری را نسبت به سامانه کوچک ارائه می‌دهد، که نشان از مزایای اقتصادی بیشتر سامانه‌های بزرگ‌تر

[1] Benefit–Cost Ratio

[2] Reliability

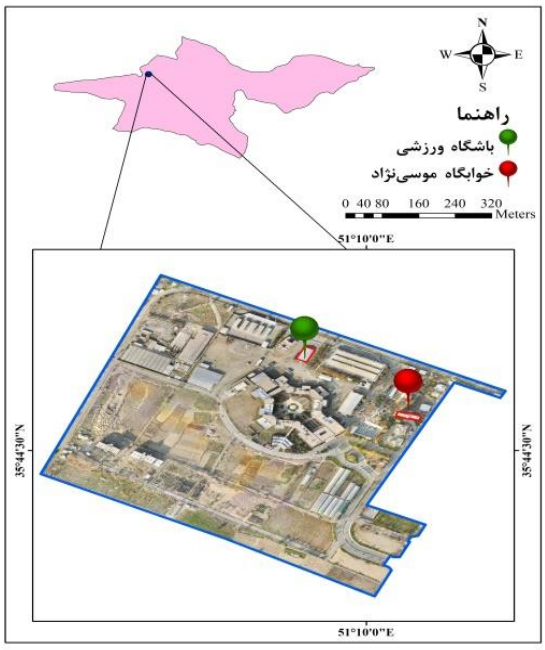
دارد. (Bashar et al.,2018) به بررسی قابلیت اطمینان و تحلیل اقتصادی سامانه‌های استحصال آب باران در نواحی مختلف بنگلادش پرداختند. نتایج تحلیل دوره بازپرداخت طرح نشان داد که هزینه‌های مربوط به نصب و نگهداری سامانه‌های استحصال آب باران بسته به شرایط توپوگرافی و آب و هوایی، بعد از دو تا شش سال جبران خواهند شد.

در این مقاله با هدف طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی سامانه‌های استحصال آب باران سطوح پشت‌بام، دو ساختمان واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس به عنوان مکان مورد مطالعه انتخاب شدند. قابلیت اطمینان، نسبت سرریز[1](نسبت مجموع کل حجم سرریز به کل حجم آب استحصال شده) و نیز بهینه‌سازی سامانه‌های مذکور به کمک روابط و معادلات تعیین شد. همچنین تحلیل اقتصادی این سامانه‌ها به کمک شاخص ارزش فعلی خالص(NPV)[2] و نسبت منفعت- هزینه و با مقایسه هزینه‌های اولیه و هزینه‌های سالیانه نگهداری سامانه با سود سالانه، انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مکان‌های مورد مطالعه در این مقاله، ساختمان‌های باشگاه ورزشی و خوابگاه موسی‌نژاد واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تعیین شدند که هم مساحت سطح آبگیر و هم حجم تقاضای آب در آن‌ها از یکدیگر متفاوت می‌باشد. شکل۱ موقعیت این مکان‌ها را نشان می‌دهد.



شکل(۱): موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

داده‌ها

در این مقاله برای شبیه‌سازی سامانه استحصال آب باران از داده‌های بارش روزانه ایستگاه هواشناسی چیتگر از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۱۷ (۲۲ ساله) که نزدیک‌ترین ایستگاه به منطقه طرح می‌باشد، استفاده شد.

مدل‌سازی سامانه استحصال آب باران

"مدل تراز آب" از حجم مخزن آب باران به عنوان یک حجم کنترلی که دارای جریان ورودی (رواناب استحصالی از پشت‌بام) و جریان‌های خروجی (مصرف آب، تلفات و سرریز) در یک دوره زمانی معین است، استفاده می‌کند. (Imteaz et al.,2012) مدل تراز روزانه و ماهانه آب را بررسی و برتری مدل تراز روزانه آب را نسبت به مدل تراز آب ماهانه نشان دادند. در این مقاله نیز روش مدل‌سازی تراز روزانه آب به دلیل سادگی تفسیر، دقت بالا و نیز پذیرش عمومی بهتر، انتخاب شد. از این مدل در تحقیقات گذشته از جمله (Rahman et al.,2012) ، (Mehrabadi et al.,

[1] Overflow Ratio
[2] Net Present Value

(Imteaz et al., 2014) ، (2013 و (Jing et al., 2017) نیز استفاده شده است. این مدل، از داده‌های روزانه بارش به عنوان منبع اولیه برای تأمین تقاضای ساکنین استفاده می‌کند و فرض می‌شود که اگر در یک روز خاص، بارش باران به تنهایی قادر به تأمین این تقاضا نباشد، از آب شهری نیز به عنوان مکمل استفاده گردد. مدل‌سازی سامانه استحصال آب باران در محیط نرم افزار متلب[1] صورت می‌گیرد. مرحله اول در این مدل‌سازی، برآورد مقادیر حجم آب استحصالی از سطح آبگیر در هر روز به‌صورت زیر می‌باشد:

حجم آب استحصالی

حجم باران هدایت شده به مخازن، به عوامل مختلفی نظیر ضریب رواناب، مساحت سطح آبگیر و نیز میزان بارش بستگی دارد. از رابطه۱ برای محاسبه حجم آب استحصالی از سطح آبگیر در هر روز استفاده می‌شود(Mehrabadi et al.,2013):

$$I_t = R_t \times A \times \emptyset \qquad (۱)$$

در این رابطه، I_t حجم رواناب استحصال‌شده در روز t (لیتر)، R_t عمق بارش در روز t (میلی‌متر)، A مساحت سطح آبگیر (مترمربع) و $\emptyset$ ضریب رواناب (بدون بعد) می‌باشد.

تعیین میزان تقاضای آب

یکی از اطلاعات اساسی مورد نیاز در طراحی سامانه‌های استحصال آب باران، تعیین میزان تقاضای داخلی آب می‌باشد. این میزان تقاضا را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$D_t = N \times d_t \qquad (۲)$$

در این رابطه، D_t مجموع تقاضای داخلی آب در روز t (لیتر)، N تعداد سکنه و d_t سرانه مصرف آب در روز t (لیتر) می‌باشد. جدول۱ سرانه مصرف آب را بدون احتساب فضای سبز نشان می‌دهد(نشریه ۳-۱۱۷ معاونت برنامه‌ریزی وزارت نیرو، ۱۳۷۱)

جدول(۱): متوسط مصرف سرانه آب

نوع مصرف	سرانه مصرف آب (l/day)
آشامیدن	۲ تا ۵
پخت و پز	۵ تا ۱۰
حمام	۲۵ تا ۵۰
لباسشویی	۱۰ تا ۲۰
ظرفشویی	۵ تا ۱۵
دستشویی و توالت	۲۰ تا ۳۰
شستشوی خانه	۳ تا ۱۰
کولر و تهویه مطبوع	۲ تا ۵
متفرقه	۳ تا ۵
جمع	۷۵ تا ۱۵۰

محاسبه مجموع تقاضای داخلی، کار چندان آسانی نمی‌باشد، چرا که پارامترهای این معادله در طول زمان متفاوت می‌باشد. مثلاً تعداد افراد حاضر در ساختمان همواره یکسان نمی‌باشد و یا این‌که مصرف افراد با یکدیگر متفاوت است، کودکان و بزرگسالان مقادیر متفاوتی آب مصرف می‌کنند. همچنین میزان مصرف آب طی فصول سرد و گرم سال نیز متغیر می‌باشد. با وجود همه این تفاوت‌ها در مصرف، باید میزان میانگین مصرف روزانه آب را برآورد کرد.

نیاز مصرفی ساکنین ساختمان‌های مورد مطالعه، همه موارد مذکور در جدول۱ را شامل نمی‌شود. بنابراین باید نوع مصرف در این ساختمان‌ها تعیین گردد. همچنین با توجه به این‌که هدف تحقیق تأمین آب غیرشرب می‌باشد، لذا مصارف شرب و پخت‌وپز باید

[1] Matlab

حذف گردند. جدول۲ نوع مصارف غیرشرب ساختمان‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد

.

جدول(۲): نوع مصرف غیرشرب ساختمان‌های مورد مطالعه

نوع مصرف	باشگاه ورزشی	خوابگاه موسی‌نژاد
متفرقه	+	+
کولر و تهویه مطبوع	+	+
دستشویی و توالت	+	+
ظرفشویی	-	+
لباسشویی	-	+
حمام	+	+

در جدول۳ به تفکیک ســـطوح مورد مطالعه از لحاظ مساحت سطح آبگیر و حجم تقاضای داخلی پرداخته شده است.

جدول(۳): تفکیک سطوح مورد مطالعه

عنوان	باشگاه ورزشی	خوابگاه موسی‌نژاد
مساحت(m^2)	۷۲۴	۵۴۵
تعداد سکنه	۳۰	۱۰۰
مصرف سرانه(L)	۲۵/۸	۹۰
مصرف کل(l/day)	۷۷۴	۹۰۰۰
ضریب رواناب	۰/۹	۰/۸

حجم آب موجود در مخزن در هر روز با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد(Mehrabadi et al.,2013):

$$V_t = I_t + V_{t-1} - O_t - SP_t \qquad (۳)$$

در این رابطه، V_t حجم ذخیره آب مخزن در روز t (لیتر)، I_t حجم آب باران استحصال شده از سطح آبگیر در روز t (لیتر)، V_{t-1} حجم ذخیره قبلی آب در مخزن در روز $(t-1)$ (لیتر)، O_t حجم آب خروجی از مخزن برای تأمین نیاز غیرشرب ساکنین در روز t(لیتر) و SPt حجم سرریز از مخزن در روز t (لیتر) می‌باشد.

در شبیه‌سازی سامانه‌های استحصال آب باران، اگر در یک روز خاص، حجم ذخیره‌سازی آب بیشتر از ظرفیت مخزن (V_{max}) باشد، آب اضافی سرریز شده و سطح ذخیره مخزن در انتهای روز مجدداً برابر با (V_{max}) تنظیم می‌گردد. حجم سرریز از مخزن با توجه به معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$SP_t = I_t + V_{t-1} - V_{max} - O_t \qquad (۴)$$

در این معادله، SP_t حجم سرریز از مخزن در روز t (لیتر) و V_{max} حجم مخزن (لیتر) می‌باشد.

با استفاده از رابطه زیر نیز می‌توان نسبت سرریز از مخزن را محاسبه کرد:

$$\mathrm{OFR} = \frac{\sum_{t=1}^{n} SP_t}{\sum_{t=1}^{n} I_t} \times 100 \qquad (۵)$$

که در آن، SP_t حجم آب سرریز شده در روز t (لیتر)، I_t حجم آب استحصال شده در روز t (لیتر) و n تعداد روزهای دوره ارزیابی می‌باشد.

برآورد قابلیت اطمینان

به منظور برآورد قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران در ساختمان‌های مورد مطالعه، داده‌های بارش روزانه ایستگاه هواشناسی چیتگر از روز یک ژانویه سال ۱۹۹۶ تا روز ۳۱ دسامبر سال ۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. قابلیت اطمینان برای تأمین نیازهای غیرشرب ساکنین بر اساس رابطه۶ محاسبه می‌شود (Imteaz et al.,2012):

$$Re = \frac{N-U}{N} \times 100 \qquad (۶)$$

که در آن N تعداد کل روزها در یک سال خاص بوده و U تعداد روزهایی از سال است که نیاز غیرشرب ساکنین در شرایط مورد نظر تأمین نمی‌شود.

بهینه‌سازی حجم مخازن

از آن‌جایی‌که اجرای سامانه‌های استحصال آب باران مستلزم صرف هزینه می‌باشد، بنابراین بی‌توجهی به مقوله تعیین حجم بهینه مخزن و بهره‌برداری نامناسب از آن‌ها، نه تنها سود پیش‌بینی شده حاصل از ایجاد سامانه‌های مذکور را تأمین نمی‌کند، بلکه در مقیاس کلی باعث هدررفت سرمایه‌های اولیه نیز می‌گردد. با افزایش حجم مخزن، حجم آب ذخیره‌شده و در نتیجه درآمد طرح افزایش می‌یابد، ولی از سویی دیگر، قیمت خرید مخزن نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین حجمی از مخزن که هم به لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه بوده و هم قابلیت ذخیره‌سازی بیشتری داشته باشد، باید تعیین گردد. یکی از روش‌های تعیین حجم بهینه مخزن، استفاده از الگوریتم ژنتیک[9] در محیط نرم‌افزار متلب می‌باشد. برای حل یک مسئله به کمک الگوریتم ژنیک، باید یک تابع هدف تعریف گردد. در این مطالعه، تابع هدف مسأله، بیشینه‌سازی سود می‌باشد. به عبارتی، باید کلیه جریان‌های نقدی سالانه طرح براساس یک نرخ تنزیل از قبل تعیین شده، به سال صفر(سال آغاز اجرای طرح) تنزیل گردد. بدین منظور، درآمدها و هزینه به کمک شاخص ارزش کنونی خالص(NPV) به سال صفر تبدیل شده و حجمی از مخزن که بیشترین NPV را داشته باشد، به عنوان حجم بهینه مخزن انتخاب می‌گردد. معادله زیر تابع هدف مسأله را نشان می‌دهد.

$$\mathrm{NPV} = -IC + \sum_{n=1}^{N} \frac{A_n}{(1+t)^n} \qquad (۷)$$

در این معادله، IC هزینه اولیه خرید مخزن، A_n سود سالانه طرح، n سال مورد نظر و t نرخ بهره می‌باشد. با توجه به افزایش سالانه قیمت آب، درآمد حاصل از پروژه نیز افزایش خواهد یافت. قیمت آب(درآمد) در سال مورد نظر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathrm{A}_n = \mathrm{A}_0 \times (1+g)^n \qquad (۸)$$

که در آن، A_0، قیمت آب در سال اول و g درصد افزایش سالانه قیمت آب می‌باشد. برای بهینه‌سازی حجم مخزن، هزینه اولیه خرید مخزن بر اساس قیمت رایج بازار تعیین شد. همچنین قیمت هر مترمکعب آب برابر ۱۰۰۰ تومان، نرخ بهره ۱۸ درصد، نرخ سالانه رشد قیمت آب برابر با ۲۰

[9] Genetic Algorithm

درصد و طول عمر مخازن ۴۰ سال تعیین شد.

تحلیل اقتصادی

به منظور انجام تحلیل اقتصادی، باید تمامی هزینه‌های اجرایی سامانه مانند هزینه خرید و نصب مخزن و نیز هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری سامانه با میزان سودی که از طریق ذخیره آب در هر سال عاید می‌شود، مقایسه گردد. تجزیه و تحلیل نسبت منفعت – هزینه برای ارزیابی دوام اقتصادی سامانه‌های استحصال آب باران انجام می‌شود. نسبت منفعت – هزینه، سود کاربران را با هزینه‌های مالی سامانه مقایسه می‌کند. اگر نسبت بیشتر از یک باشد، پروژه سودمند تلقی می‌شود ولی اگر نسبت کمتر از یک باشد، این پروژه غیراقتصادی است. به عنوان یک روش استاندارد، تمام درآمدها و هزینه‌ها با درنظر گرفتن نرخ بازده سالانه، به NPV تبدیل می‌شوند. روابط زیر برای برآورد نسبت منفعت- هزینه مورد استفاده قرار می‌گیرند(Karim et al.,2015):

$$NPV_{(B)}.B = A \times \frac{(1+i)^n-1}{i\times(1+i)^n} \quad (۹)$$

$$NPV_{(C)}.C = IC + OM \times \frac{(1+i)^n-1}{i\times(1+i)^n} \quad (۱۰)$$

$$\frac{B}{C} = \frac{PWB}{PWC} \quad (۱۱)$$

در معادلات فوق، B/C نسبت منفعت- هزینه، PWB ارزش فعلی درآمدها[10]، PWC ارزش فعلی هزینه‌ها[11]، i نرخ بازگشت سرمایه(درصد)، n طول عمر پروژه، A درآمد سالانه، IC هزینه خرید و نصب مخزن و OM هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری سامانه می‌باشد که به دلیل ناچیز بودن هزینه نگهداری سامانه، در این مقاله OM برابر با صفر درنظر گرفته شد.

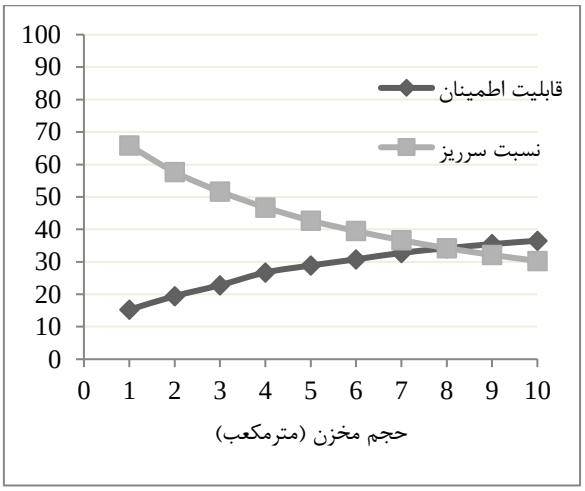
نتایج و بحث

نتایج قابلیت اطمینان و نسبت سرریز

شکل۲ بیانگر روند تغییرات درصد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز به ازای حجم‌های مختلف مخزن برای ساختمان باشگاه ورزشی می‌باشد. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش حجم مخزن، درصد قابلیت اطمینان روند صعودی داشته و پیوسته از شیب این روند صعودی کاسته می‌شود، به طوری که قابلیت اطمینان، به یک عدد ثابت گرایش می‌یابد که این نتیجه همسو با نتایج تحقیقات (Mehrabadi et al.,2013) ، (Karim et al., 2015) و (Lani et al., 2018) و (Bashar et al., 2018) می‌باشد. همچنین با توجه به این شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش حجم مخزن، نسبت سرریز از مخزن روند نزولی پیدا می‌کند که این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات (Karim et al.,2015) و (Bashar et al., 2018) هم‌خوانی دارد. در این ساختمان، با استفاده از یک مخزن یک مترمکعبی، در ۱۵/۲۵ درصد از روزهای سال می‌توان نیاز غیرشرب ساکنین را پاسخ داد که در این صورت نسبت سرریز ۶۵/۸۳ درصد خواهد بود ولی اگر از یک مخزن ۱۰ مترمکعبی استفاده گردد، درصد قابلیت اطمینان افزایش و نسبت سرریز کاهش یافته و به ترتیب برابر با ۳۶/۵ و ۳۰/۲۹ درصد خواهند شد

[10] Present Worth of Benefits

[11] Present Worth of Costs

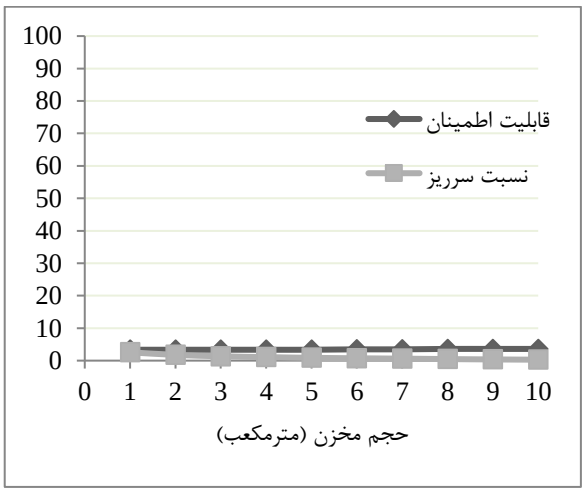


شکل(۲): درصد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز به ازای حجم‌های مختلف مخازن برای باشگاه ورزشی

شکل۳ درصد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز از مخزن را به ازای حجم‌های مختلف مخزن برای خوابگاه موسی‌نژاد نشان می‌دهد. با توجه به این‌که حجم روزانه تقاضای آب در این ساختمان زیاد می‌باشد، لذا سامانه استحصال آب باران، قابلیت اطمینان کمتری دارد و درصد کمی از روزهای سال می‌تواند نیاز غیرشرب ساکنین را تأمین نماید ولی این درصد اندک قابلیت اطمینان نیز حجم زیادی آب را می‌طلبد. همچنین تقاضای زیاد داخلی موجب گردیده تا میزان سرریز از مخزن این ساختمان بسیار اندک و نزدیک به صفر گردد. با توجه به نمودارهای به‌دست آمده برای سطوح مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش میزان تقاضای آب، درصد قابلیت اطمینان مخازن کم‌تر می‌گردد که این نتیجه با نتایج تحقیقات (Mehrabadi et al.,2013) ، (Karim et al., 2015) و (Bashar et al., 2018) مطابقت دارد.

نتایج بهینه سازی

نتایج بهینه‌سازی حجم مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با احتساب هزینه خرید و نصب این مخازن در جدول۴ نشان داده شده است



شکل(۳): درصد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز به ازای حجم‌های مختلف مخزن برای خوابگاه موسی‌نژاد

.

جدول(۴): مقادیر حجم بهینه مخازن ساختمان‌ها و هزینه خرید و نصب آن‌ها

محدوده	حجم بهینه (m^3)	هزینه خرید و نصب مخزن (Rials)
باشگاه ورزشی	۲/۴۱۵	۱۹,۰۰۰,۰۰۰
خوابگاه موسی‌نژاد	۱	۸,۵۰۰,۰۰۰

نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که با توجه به تقاضای بالای آب در خوابگاه موسی‌نژاد، اکثر رواناب دریافتی در همان روز مصرف شده و مخزن در آخر روز خالی می‌گردد. لذا نیازی به نصب مخزن حجیم‌تر برای ذخیره آب برای روز بعد نیست. بنابراین حجم مخزن بهینه مخزن در این ساختمان کم‌تر از ساختمان باشگاه ورزشی می‌باشد.

نتایج تحلیل اقتصادی

تحلیل اقتصادی سامانه استحصال آب باران با احتساب حجم‌های بهینه به‌دست آمده برای هر ساختمان و با درنظر گرفتن هزینه‌های خرید و نصب مخازن و همچنین درآمد حاصل از ذخیره آب صورت گرفت. همچنین نرخ بازگشت سرمایه برابر با ۱۲ درصد درنظر گرفته شد. نتایج نسبت منفعت- هزینه مطابق جدول۵ می‌باشد

جدول(۵): نسبت منفعت- هزینه برای ساختمان‌های مورد مطالعه

عنوان	باشگاه ورزشی	خوابگاه موسی‌نژاد
ذخیره سالانه آب (m^3)	۸۲	۱۲۰
درآمد سالانه (Rials)	۸۲۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰
هزینه کل (Rials)	۱۹۰۰۰۰۰۰	۸۵۰۰۰۰۰
نسبت B/C	۰/۳۵۵	۱/۱۶

با توجه به جدول فوق مشاهده می‌گردد که اجرای سامانه استحصال آب باران برای ساختمان باشگاه ورزشی صرفه اقتصادی نداشته و نسبت منفعت- هزینه در این ساختمان برابر با ۰/۳۵۵ می‌باشد در حالی که این نسبت برای ساختمان خوابگاه موسی‌نژاد برابر با ۱/۱۶ بوده و نشان از اقتصادی بودن اجرای سامانه استحصال آب باران در این ساختمان دارد. این در حالی است که هم سطح آبگیر و هم ضریب رواناب و در نتیجه حجم آب استحصالی ساختمان باشگاه ورزشی نسبت به ساختمان خوابگاه موسی‌نژاد بیشتر می‌باشد. دلیل این تضاد در تحلیل اقتصادی ساختمان‌های فوق، بالا بودن حجم تقاضای آب در خوابگاه موسی‌نژاد می‌باشد که موجب می‌شود اغلب رواناب استحصالی در همان روز استفاده شده و نیازی به خرید مخزن با حجم بیشتر برای ذخیره آب نباشد. این عامل هم موجب ذخیره‌سازی بیشتر آب و سرریز کمتر و هم موجب کاهش هزینه اولیه خرید و نصب مخزن می‌شود. همچنین در ساختمان باشگاه ورزشی به دلیل تقاضای کم آب، نسبت سرریز بسیار بالا بوده و در نتیجه درآمد حاصل از اجرای سامانه کاهش خواهد یافت.

همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که به دلیل پایین بودن قیمت آب در ایران، نسبت منفعت به هزینه کم شده که این نتیجه همسو با نتایج (Kim and Yoo.,2009) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف ارزیابی عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران، به برآورد قابلیت اطمینان، نسبت سرریز و بهینه‌سازی حجم مخزن این سامانه‌ها در دو ساختمان با مساحت و تقاضای آب متفاوت در دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس پرداخته شد و در آخر تحلیل اقتصادی برای هر دو ساختمان صورت گرفت. نتایج نسبت سرریز و قابلیت اطمینان نشان داد که در خوابگاه موسی‌نژاد با توجه به تقاضای زیاد آب، نسبت سرریز و قابلیت اطمینان کم می‌باشد ولی در مقابل در ساختمان باشگاه ورزشی، تقاضای کم آب موجب شد تا درصد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز بیشتر باشد.

حجم مخزن یک عامل مهم در به حداکثر رساندن حجم ذخیره آب باران می‌باشد که بهینه‌سازی آن پیچیده بوده و به میزان بارندگی سالانه، مساحت سطح آبگیر و تقاضای آب بستگی دارد. با درنظر گرفتن حجم‌های بهینه به‌دست آمده، حجم سالانه آب ذخیره شده برای ساختمان باشگاه ورزشی و خوابگاه موسی‌نژاد به ترتیب برابر با ۸۲ و ۱۲۰ مترمکعب می‌باشد. در ساختمان باشگاه ورزشی به دلیل تقاضای کم آب، نسبت سرریز بالا می‌باشد و اگر ملاک انتخاب حجم مخزن تنها ذخیره بیشتر آب باشد، حجم آب استحصالی بیشتر خواهد شد.

افزایش طول عمر و سود سامانه موجب افزایش نسبت منفعت- هزینه شده و در سویی دیگر، افزایش نرخ بازگشت سرمایه و هزینه‌های خرید و نصب مخزن، موجب کاهش نسبت منفعت- هزینه می‌شود. اجرای سامانه استحصال آب باران برای ساختمان باشگاه ورزشی توجیه اقتصادی نداشته که دلیل این امر تقاضای کم و درنتیجه سرریز زیاد می‌باشد. در حالی که اجرای این سامانه‌ها برای خوابگاه موسی‌نژاد با وجود کمتر بودن مساحت سطح آبگیر نسبت به ساختمان باشگاه ورزشی، موجه بوده که دلیل این امر تقاضای بالای آب در این خوابگاه می‌باشد که موجب کاهش هزینه خرید مخزن و ذخیره هرچه بیشتر آب می‌شود.

منابع

تاران، ف.، ق. مهتابی. ۱۳۹۵. بررسی تأمین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف شهر از طریق استحصال آب باران؛ مطالعه موردی شهر بناب. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، ۷(۲۵): ۱۹۸-۲۱۳.

دفتر تحقیقات و معیارهای فنی، مبانی و ضوابط طراحی طرح‌های آبرسانی شهری، نشریه ۳-۱۱۷، سازمان برنامه و بودجه. ۱۳۷۱.

طباطبائی یزدی، ج.، ح. توکلی. ۱۳۸۹. گزارش طرح پژوهشی استحصال آب باران برای تأمین بخشی از آب مورد نیاز فضای سبز مشهد. وزارت جهاد کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی.

قاسمی، س. ۱۳۸۹. ارزیابی و طراحی سیستم‌های جمع‌آوری آب باران برای مصارف خانگی(مطالعه موردی: شرق آق‌قلا، استان گلستان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

Bashar, M. Z. I., M. R. Karim and M. A. Imteaz. 2018. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: A comparative study within six major cities of Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling, 133(1): 146-154.

Imteaz, M. A., O.B. Adeboye, S. Rayburg and A. Shanableh. 2012. Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. Resources, Conservation and Recycling, 62(1): 51-55.

Imteaz, M. A., C. Matos and A. Shanableh .2014. Impacts of climatic variability on rainwater tank outcomes for an inland city, Canberra. Hydrology Science and Technology, 4(3): 177-191.

Jing, X., S. Zhang, J. Zhang, Y. Wang and Y. Wang. 2017. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. Resources, Conservation and Recycling, 126(1): 74-85.

Karim, M. R., M. Z. I. Bashar and M. A. Imteaz. 2015. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting in a megacity in Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling, 104(1): 61-67.

Kim, K and C. Yoo. 2009. Hydrological modeling and evaluation of rainwater harvesting facilities: case study on several rainwater harvesting facilities in Korea. Hydrologic Engineering, 14(6): 545-561.

Lani, N. H. M., A. Syafiuddin, Z. Yusop and M. Z. Bin Mat Amin. 2018. Performance of small and large scales rainwater harvesting systems in commercial buildings under different reliability and future water tariff scenarios. Science of the Total Environment, 636(15): 1171-1179.

Mehrabadi, M. H. R., B. Saghafian and F. Fashi. 2013. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. Resources, Conservation and Recycling, 73(1): 86-93.

Mun, J. S and M. Y. Han. 2012. Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: definition, sensitivity and verification. Environmental Management, 93(1): 147-153.

Rahman, A., J. Keane and M. A. Imteaz. 2012. Rainwater harvesting in greater Sydney: water savings, reliability and economic benefits. Resources, Conservation and Recycling, 61(1): 16-21.

Rahman, S., M. T. R. Khan, S. Akib, N. B. C. Din, S. K. Biswas and S. M. Shirazi. 2014. Sustainability of rainwater harvesting system in terms of water quality. The Scientific World Journal, (2014).

Reliability, Optimization and Economic Analysis of the Rainwater Harvesting System from the Rooftop

Hadi Shokati[۱۲], Mahdi Kouchakzadeh*[۱۳], Aliakbar Noroozi[۱۴]

Abstract

Performance assessing and economic analysis of rainwater harvesting systems, which is one of the most effective methods to deal with the crisis of water scarcity, will lead to better management of these systems. The purpose of this study was to evaluate the performance of rainwater harvesting systems, Musanejad dormitory and sports club buildings in Tarbiat Modares University, Faculty of Agriculture were selected as study areas. Then, the 22 years old daily precipitation data of the Chitgar Weather Station was prepared. System simulation was performed in Matlab software and reliability and overflow ratio of storage tanks were determined. The Genetic Algorithm was used to determine the optimal volume of the tanks of both buildings and finally, an economic analysis of these systems was carried out using the Net Present Value method and benefit-cost ratio. The results showed that the optimum volume of tanks for the Sports Club and Musanejad dormitory was 2,415 and 1 cubic meters, respectively. These tanks can store up to 82 and 120 cubic meters of water per year, respectively. The results also showed that the performance of rainwater harvesting systems was beneficial for the Musanejad dormitory but had no economic justification for the sports club due to low demand and high overflow.

Keywords: Economic Analysis, Genetic A

[12] Graduate of Irrigation and Drainage Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Hadi99Shokati@Gmail.Com
[13] Associate Professor of Irrigating and Drainage Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: Kouchakm@Modares.ac.ir
[14] Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. Email: Noroozi.aa@Gmail.Com