

## Research Paper

# Designing of Rainwater Harvesting Systems Using Drone Images

Hadi Shokati<sup>1\*</sup>, Mahdi Kouchakzadeh<sup>2</sup>, Aliakbar Noroozi<sup>3</sup>

1. M.Sc. Student, Irrigation and Drainage Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2. Associate Professor of Irrigation and Drainage Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 2019.9.19

Revised: 2020.2.6

Accepted: 2020.3.20

Use your device to scan and read the article online



DOI: [10.30495/wej.2021.4590](https://doi.org/10.30495/wej.2021.4590)

### Keywords:

Genetic Algorithm, Drone, Catchment Area, Reliability, Overflow Ratio

### Abstract

**Introduction:** Iran is facing shortage of water resources due to the climate in which it is located. Since large areas of urban surfaces are impenetrable streets, the volume of water harvested from these surfaces is significant and can reduce the pressure on water resources and meet a large portion of the non-potable demands, it also prevents the spread of pollution caused by overflows and backlogs in surface water collection facilities and uneconomic increase of their volumes.

**Materials and Methods:** In this paper, the design of rainwater harvesting system from asphalt surfaces was carried out with the aim of meeting part of the green space demand of Tarbiat Modares University faculty of agriculture, using drone images. For this purpose, available data of 22 years of daily precipitation and 761 aerial images were obtained using DJI Phantom3 Professional drone. Then, the digital elevation map of the case study was prepared and to determine the runoff direction, the basin of the area was carried out in the GIS. Reliability percentage and overflow ratios of the tanks were estimated for each level for different tank volumes. Then the optimal volume of each tank was determined using genetic algorithm.

**Findings:** The results showed that due to the topographic status of the faculty street surfaces, the runoff from them could not be collected in one tank, so 4 tanks A, B, C and D with optimized volumes of 6.15, 3.46, 1 and 20 cubic meters were considered in different parts of the street surfaces, respectively.

**Conclusion:** With designing rainwater harvesting systems, a significant amount of rainwater can be stored for non-potable consumption.

**Citation:** Shokati H, Kouchakzadeh M, Noroozi A. Designing of Rainwater Harvesting Systems Using Drone Images. Water Resource Management. Water Resources Engineering Journal. 2021; 14 (48): 73- 85.

\*Corresponding author: Hadi Shokati

Address: MSc Student, Irrigation and Drainage Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Tell: 00989145757370

Email: [hadi99shokati@gmail.com](mailto:hadi99shokati@gmail.com)

## Extended Abstract

### Introduction

Climatically, Iran is one of the arid and semi-arid regions of the world. Frequent droughts and excessive groundwater extraction are critical to the country's water situation. Population growth, traditional agriculture, inefficient management, and a desire for development have also exacerbated the crisis. On the other hand, the distribution of precipitation in the country is not the same and most of the precipitation occurs on the shores of the Caspian Sea and the western half of the country. Therefore, due to Iran's small share of freshwater, it is necessary to find a solution to compensate for the deficit of water supply and demand balance. One of the well-known and old methods of providing non-potable water is the construction of rainwater harvesting systems. Compensating for water scarcity by increasing water resources is not the only advantage of rainwater harvesting systems, but if they are properly designed, they can also reduce the volume of urban runoff, which reduces the size of runoff collection facilities and prevents the spread of pollution. This paper aims to design a rainwater harvesting system for Tarbiat Modares University's college of agriculture using unmanned aerial vehicle (UAV) images to meet the water demands of the college's green space.

### Materials and Methods

The college of agriculture, Tarbiat Modares University, located in Tehran, was selected as the study area. This college covers an area of 35 ha, of which 2.8 ha are street surfaces. In this paper, images of DJI Phantom3 Professional UAV were used to prepare the map of the college. Flight information including flight height, sweep width, image overlap, and shooting range was given to the UAV using the PIX4D CAPTURE software and the UAV begins to imaging according to this information. Also the Agisoft. Photoscan software was used to process the images. In this software, the images taken with the UAV, based on their coordinates, which are recorded by the UAV's GPS, are mosaicked. To determine the runoff direction, the basin

of the study area was carried out using the digital elevation map in the GIS software and then, stream networks were drawn. Since the trees in the college have different species and ages and also the green space of the college is non-standard, so in this study, the average water demand of each tree was considered 6 L/day and Alfalfa and Grass water demands was considered 5 mm/day according to previous experiences. Trees and green spaces do not need irrigation during the rainy season, but to prevent runoff and water losses, it was assumed that the demand was constant throughout the year, and the stored water during rainfall could be used to provide other non-potable uses. The modeling of the rainwater harvesting system was performed using daily water balance modeling technique in MATLAB software. One method to determine the optimal volume of tanks is to optimize in Matlab software using a genetic algorithm. To solve a problem using a genetic algorithm, it must be converted into the special form required for this algorithm. Therefore, an objective function must be defined. In this paper, the objective function was considered to maximize profits. Therefore, all annual expenses and revenues should be converted into the start year of the project. Hence, revenues and expenses were converted into the first year using the net present value index (NPV), and the volume of the tank with the highest NPV was selected as the optimal volume of the tank.

### Findings

To generate the digital elevation map, the images of the UAV were processed using Agisoft.Photoscan software. Due to the topographic condition of asphalt surfaces, their runoff cannot be collected in one tank, therefore, 4 tanks (A, B, C and D) were considered in different parts of the college. To eliminate additional costs, all tanks were considered underground, so that, runoff could enter them gravitationally. Hence, there was no need to pump runoff into them and also prevent space occupancy. However, it is necessary to pump the stored water to distribute it in the consumption sites. The

reliability results showed that on A Street, the maximum number of days that harvested rainwater from the surface of this street can meet the surrounding green space demand is equal to 57.85% of all days of the year and the lowest percentage is related to the tank with  $1\text{m}^3$ , which is equal to 13.64%. Among the assessed streets, the lowest reliability percent is related to C Street, so that, on this street, the maximum number of days that the harvested rainwater can meet the daily demand of the surrounding green space is equal to 2.73% and the lowest percentage of meeting this water demand is equal to 2.09% of the all days of the year. Also the tank optimization results showed that due to the relatively low catchment area connected to Tank C, the volume of runoff entering this tank is also low. On the other hand, the water demand from this tank is significant. Therefore, the daily runoff entering it is consumed at the end of the day and there is no need to install larger tanks to store water for the next day. Hence, the optimal volume of Tank C was equal to  $1\text{m}^3$ . Also, due to the low catchment area connected to Tank D, the volume of runoff entering this tank is high and a tank with a large volume must be used to be able to store this volume of water.

### Discussion

In this paper, the reliability and overflow ratio of a rainwater harvesting system and finally the design steps of the mentioned system, including specifying the stream network, determining the installation location of the tanks, and the optimal volume of the tanks were examined. The results are as follows:

- Based on selected optimal volumes, for Tanks A, B, C, and D, about 159809, 8306, 420655 and 895856 liters of water can be stored per year, respectively. However, if the final cost is not considered, more water

can be stored by selecting larger tank volumes.

- As the volume of the tank increases, the reliability percent will also increase, which the slope of the curve dwindles, as long as the reliability percent tends to be constant, which will not be economical to use tanks larger than this value.
- As the water demand increases, the reliability percent decreases, and stored rainwater will be able to meet water demand in a low percentage of the days of the year.
- If the volume of used tanks is large, the overflow ratio will decrease, so that there will be no more overflow and it will not be economical to use tanks with a larger volume.

### Conclusion

Finally, according to the findings of the present study, it can be concluded that with designing rainwater harvesting systems, a significant amount of rainwater can be stored for non-potable consumption.

### Ethical Considerations

#### Compliance with ethical guidelines

All subjects full fill the informed consent.

### Funding

The costs of the present study were provided by Tarbiat Modares University.

### Authors' contributions

Design and conceptualization: Hadi Shokati, Mahdi Kouchakzadeh, Aliakbar Noroozi; Methodology and data analysis: Hadi Shokati, Mahdi Kouchakzadeh, Aliakbar Noroozi; Supervision and final writing: Hadi Shokati.

### Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

## مقاله پژوهشی

## طراحی سامانه استحصال آب باران به کمک تصاویر پهپاد

هادی شوکتی<sup>۱\*</sup>، مهدی کوچکزاده<sup>۲</sup>، علی اکبر نوروزی<sup>۳</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

## چکیده

**مقدمه و هدف:** کشور ایران به لحاظ اقلیمی که در آن قرار گرفته است، با مشکل کمبود منابع آبی مواجه است. از آنجا که سطح وسیعی از مساحت شهرها را سطوح نفوذناپذیر خیابان‌ها تشکیل می‌دهند، حجم آب استحصال‌ی از این سطوح قابل توجه بوده و می‌تواند فشار بر منابع آب را کاهش دهد و پاسخگوی بخش عمده‌ای از نیازهای غیرشرب باشد. ضمن آن که از گسترش آلودگی ناشی از سرریز و پس‌زدگی تأسیسات جمع‌آوری آب‌های سطحی و افزایش غیراقتصادی ابعاد آن‌ها جلوگیری می‌کند.

**مواد و روش‌ها:** در این مطالعه، طراحی سامانه استحصال آب باران از سطوح آسفالت با هدف تأمین بخشی از نیاز فضای سبز دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، با استفاده از تصاویر پهپاد انجام شد. بدین منظور، داده‌های در دسترس ۲۲ ساله بارش روزانه و ۷۶۱ تصویر هوایی با استفاده از پهپاد DJI Phantom 3 Professional تهیه شد. سپس مدل رقومی ارتفاع منطقه شد و برای تعیین مسیر رواناب، حوضه‌بندی منطقه در محیط GIS صورت گرفت. پارامترهای درصد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز از مخزن برای هر سطح به ازای حجم‌های مختلف مخازن برآورد گردید. سپس حجم بهینه هریک از مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین شد.

**یافته‌ها:** با توجه به وضعیت توپوگرافی سطوح خیابان دانشکده، رواناب حاصل از آن‌ها قابل جمع‌آوری در یک مخزن نیست، لذا ۴ مخزن A، B، C و D با حجم‌های بهینه شده به ترتیب برابر با ۶/۱۵، ۳/۴۶، ۱ و ۲۰ مترمکعب در نقاط مختلف سطوح خیابان‌ها در نظر گرفته شد.

**بحث و نتیجه‌گیری:** با طراحی سامانه‌های استحصال آب باران، می‌توان حجم قابل توجهی از آب باران را برای مصارف غیرشرب دانشکده ذخیره نمود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۲۸

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱/۱

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI:10.30495/wej.2021  
4590

## واژه‌های کلیدی:

الگوریتم ژنتیک، پهپاد، سطوح آبیاری، قابلیت اطمینان، نسبت سرریز

\* نویسنده مسئول: هادی شوکتی

نشانی: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

تلفن: ۰۹۱۴۵۷۵۷۳۷۰

پست الکترونیکی: hadi99shokati@gmail.com

## مقدمه

ایران به لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه خشک جهان محسوب می‌گردد. خشک‌سالی‌های مکرر همراه با برداشت بیش از تغذیه آب‌های زیرزمینی، وضعیت آب کشور را به سطح بحرانی رسانده است. از سوی دیگر، افزایش جمعیت، کشاورزی سنتی، مدیریت ناکارآمد و نیز عطش توسعه، بر شدت این بحران افزوده است. از طرفی پراکندگی نزولات جوی در کشور یکسان نبوده و اغلب بارش‌ها در سواحل دریای خزر و نیمه غربی تا جنوب غرب به وقوع می‌پیوندد. بر این اساس و با توجه به سهم اندک ایران از آب‌های شیرین زمین، لزوم یافتن راه حلی برای جبران کسری بیابان عرضه و تقاضای آب نمایان می‌گردد. یکی از روش‌های شناخته شده و قدیمی برای تأمین آب غیرشرب مورد نیاز، احداث سامانه‌های استحصال آب باران است. جبران کمبود آب از طریق افزایش منابع آب، تنها مزیت سامانه‌های استحصال آب باران نیست، بلکه اگر این سامانه‌ها مناسب طراحی شده باشند، می‌توانند در راستای کاهش حجم رواناب شهری نیز عمل نمایند که موجب کوچک شدن ابعاد تأسیسات جمع‌آوری رواناب و صرفه اقتصادی از یک سو و پیشگیری از گسترش آلودگی ناشی از سرریز و پس‌زدگی در این تأسیسات می‌گردد.

هدف از این مطالعه، طراحی سامانه استحصال آب باران دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس با استفاده از تصاویر پهپاد است. نظایر این طراحی در بررسی‌هایی که انجام شد، یافت نگردید. البته به بخش‌هایی از تحقیقات انجام شده که می‌توان در طراحی سامانه استحصال آب باران از آن‌ها استفاده نمود و عمدتاً معیارهای طراحی را شامل می‌شوند، اشاره می‌گردد. مطالعات صورت گرفته، از روش‌های مختلفی برای طراحی مخزن بهینه استفاده کرده‌اند. محققانی از جمله گوو و باتنز (۷)؛ کودن و همکاران (۵)؛ جونز و هانت (۱۲)؛ آساید و همکاران (۲)؛ هانسون و ووگل (۸)؛ وانگ و زیمرمن (۳۳)؛ روستاد و همکاران (۲۰) نیز تحقیقاتی را در راستای محاسبه حجم بهینه مخازن جمع‌آوری آب باران صورت دادند. نتایج بدست آمده توسط این محققان، اغلب برای مناطق یا شهرهای خاص کاربرد داشته و به طور معمول، از داده‌های بارش موجود محلی برای بهینه‌سازی طراحی استفاده می‌کنند. طراحی مخزن بهینه با به حداقل رساندن هزینه کل نیز توسط دیگر محققان مورد بررسی قرار گرفته است. کیم و یو (۱۳) نشان دادند که به دلیل ارزان بودن قیمت آب در کره جنوبی، نسبت سود-هزینه برای سامانه‌های استحصال آب باران با نرخ تنزیل ۵.۷۵ درصد، کمتر از ۲۰ درصد است. فیوکس (۶) در مطالعه‌ای، به بررسی مخازن آب باران برای مصارف خانگی در انگلستان پرداخت و مجموعه‌ای از منحنی‌های بدون بعد را برای طراحی تولید کرد که می‌توان براساس آن‌ها، حجم بهینه مخازن آب باران را با توجه به مساحت پشت‌بام و الگوهای تقاضای آب محاسبه کرد. لیاو و تسای (۱۶) در مطالعه‌ای با بررسی حجم بهینه مخزن تحت سناریوهای مختلف نشان دادند که زمانی که ظرفیت ذخیره‌سازی کم و تقاضای آب زیاد در نظر گرفته شود، قابلیت اطمینان (درصدی از روزهای سال که بتوان با آب باران، نیاز فضای

سبز را پاسخ داد) مخازن آب باران، صفر خواهد شد. باسینگر و همکاران (۴) قابلیت اطمینان مخازن آب را به عنوان یک منبع تأمین آب برای مصارف فلاش‌تانک، آبیاری باغ و سامانه‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌های مسکونی چند واحدی در نیویورک بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که آب باران جمع‌آوری شده می‌تواند نیازهای آبیاری باغ و سامانه‌های تهویه مطبوع را با قابلیت اطمینان ۹۰-۸۰ درصد تأمین کند. طباطبائی یزدی و توکلی (۱) طرحی را با عنوان «بررسی امکان استحصال آب باران برای تأمین بخشی از آب مورد نیاز فضای سبز مشهد» صورت دادند که در آن پس از هر بارندگی، رواناب سطوح آسفالت منطقه مورد مطالعه از مسیر سابق خود (زهکش شهر) منحرف شده و به داخل مخزن ذخیره احداث شده در منتهی‌الیه محوطه هدایت شد تا در طول فصل خشک به مصرف فضای سبز مورد نظر برسد. جهت بهره‌برداری از رواناب سطحی جمع‌آوری شده، یک موزه گیاهان مرتعی به وسعت حدود ۲ هکتار ایجاد شد که در آن نزدیک به ۹۰ گونه درختی و درختچه‌ای که مناسب برای تکثیر در فضای سبز شهری می‌باشد، کاشته شده و برای اعمال مدیریت بهتر و مصرف بهینه آب، منطقه کشت به سیستم آبیاری تحت فشار به روش قطره‌ای مجهز گردید. نتایج نشان داد که از میان گونه‌های مختلف کشت شده، تعداد ۲۰ گونه گیاهی مقاومت چندان از خود نشان ندادند و به تدریج خشک شده و یا دچار توقف رشد گردیدند و گونه درخت پروانه با ۱۲۵ سانتی‌متر در طی یک دوره رشد در سال ۱۳۸۸، بیشترین رشد ارتفاعی را دارا بود. سمپل و لیو (۲۱) از روش‌های برنامه‌نویسی غیرخطی برای بررسی رابطه بین حداکثر ذخیره‌سازی آب باران و حداقل‌سازی رواناب، استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که سود خالص طرح، به شدت به هزینه‌های آب و فاضلاب حساس است. بسیاری دیگر از محققین از جمله والش و همکاران (۲۲)؛ لی و همکاران (۱۵) هرکدام در تحقیقات جداگانه‌ای، به بررسی نقش سامانه استحصال آب باران در کنترل رواناب در مناطق مختلف پرداختند. نتایج حاکی از آن است که اجرای سامانه استحصال آب باران در این مناطق، تا حد زیادی رواناب و به تبع آن خسارات زیست محیطی را کاهش می‌دهد.

در این تحقیق با توجه به کمبود آب برای آبیاری فضای سبز دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس، طراحی سامانه‌های استحصال آب باران از سطوح آسفالت خیابان‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، به کمک تصویربرداری با پهپاد، نقشه رقومی و در نتیجه حوضه‌بندی منطقه در محیط نرم‌افزار GIS انجام شد و قابلیت اطمینان سامانه‌های مذکور و همچنین نسبت سرریز (OFR)<sup>۲</sup> برای مخازن با حجم‌های مختلف به کمک روابط و معادلات تعیین شد و در نهایت، حجم بهینه مخازن تعیین شده و مناسب‌ترین مکان برای استقرار این مخازن مشخص گردید.

## 1. Reliability

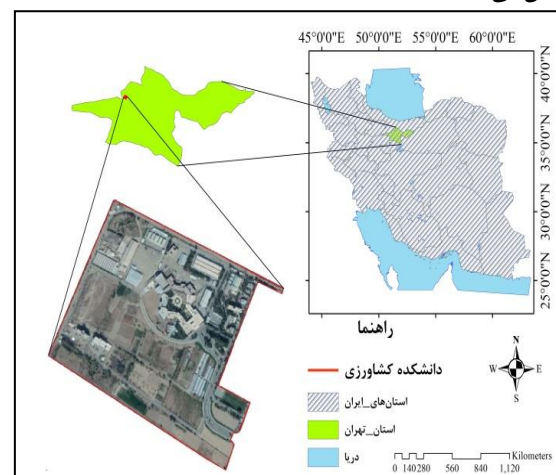
## 2. Overflow Ratio



## مواد و روش‌ها

## منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس واقع در پیکان شهر استان تهران (کیلومتر ۱۷ اتوبان تهران کرج) است. این دانشکده با وسعتی قریب به ۳۵ هکتار که نزدیک به ۲/۸ هکتار آن را سطوح خیابان‌ها تشکیل می‌دهند، در سال‌های اخیر با مشکل جدی کمبود آب برای آبیاری فضای سبز و سایر مصارف غیرشرب مواجه بوده است، به نحوی که سطح آب سه حلقه چاه موجود در دانشکده طی ۱۰ سال اخیر حدود ۴۵ متر افت کرده است. با توجه به میزان متوسط بارش در این منطقه و وسعت سطوح آسفالت آن می‌توان سالانه حجم قابل توجهی از بارش‌ها که در حال حاضر بصورت رواناب جاری می‌شود را جمع‌آوری و در مصارفی نظیر آبیاری فضای سبز مورد استفاده قرار داد. شکل ۱ نمای کلی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

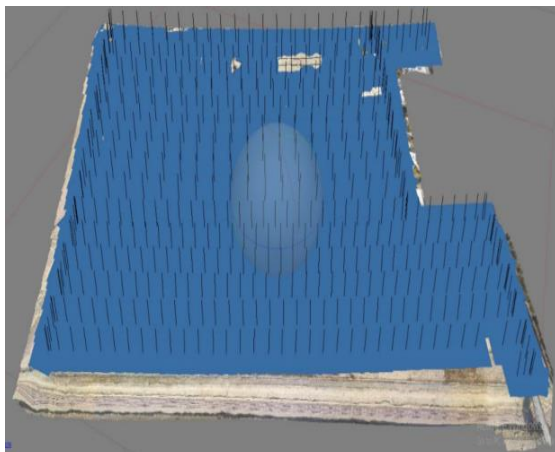


شکل ۱- نمای کلی منطقه مورد مطالعه.

## تهیه نقشه منطقه

در طراحی سامانه‌های استحصال آب باران، تهیه نقشه منطقه از اهمیت خاصی برخوردار است، چرا که توپوگرافی منطقه، تعیین کننده جهت رواناب و در نتیجه مساحت سطح متصل به مخزن است. یکی از روش‌های مناسب تهیه نقشه منطقه، استفاده از هواپیمای بدون سرنشین (پهپاد<sup>۱</sup>) است. بدین صورت ابتدا خط‌القعرها و خط‌الراس‌ها را مشخص کرده و سپس جهت حرکت رواناب تعیین می‌گردد. بنابراین تعیین جهت رواناب، تعیین کننده مساحت سطح آبگیر متصل به مخزن خواهد بود. بدیهی است که در صورت عدم وجود موانع در مسیر حرکت رواناب، بهترین محل برای نصب مخازن، در انتهای پایین خط‌القعرها خواهد بود، به نحوی که امکان انتقال آب جمع‌آوری شده به صورت نقلی به داخل مخازن وجود داشته باشد. در این تحقیق، برای تهیه نقشه از تصویربرداری به کمک پهپاد DJI Phantom3 Professional با مشخصات زیر استفاده گردید:

وزن این پهپاد همراه با باتری و پروانه حدود ۱۲۱۶ گرم است و از قابلیت GPS پشتیبانی می‌کند. این پرنده توانایی حمل بار تا وزن ۷۰۰ گرم و تا ارتفاع ۵۰۰ متری از سطح زمین با مدت زمان پروازی ۲۰ دقیقه و برد رادیو کنترل دو کیلومتر را دارد. دوربین جانمایی شده در این پرنده از نوع FC300X (3.61mm) است و با کیفیت بالا، پرنده را از قرار دادن هر نوع دوربین دیگری بی‌نیاز کرده است. این دوربین توانایی تصویربرداری در فرمت‌های DNG و JPEG تا رزولوشن<sup>۲</sup> ۴۰۰۰ × ۳۰۰۰ پیکسل<sup>۳</sup> را دارد. علاوه بر آن، این محصول مجهز به یک گیسمال سه محوره کامل برای اتصال دوربین به پهپاد است که تصاویر را عاری از هرگونه تکان و لرزشی می‌نماید. با استفاده از نرم‌افزار Pix4d Capture، اطلاعات پرواز شامل ارتفاع پرواز، عرض جوار، میزان همپوشانی تصاویر و نیز محدوده تصویربرداری به پهپاد داده می‌شود و پهپاد مطابق این اطلاعات، شروع به حرکت می‌کند. نرم‌افزار مذکور، بسته به ارتفاع پرواز و میزان همپوشانی تصاویر، تعداد عکس‌ها و مدت زمان لازم برای برداشت این تصاویر را مشخص می‌کند. تصاویر برداشت شده از منطقه، به منظور تولید خروجی‌های مورد نیاز، باید پردازش گردند. در این تحقیق، برای پردازش تصاویر از نرم‌افزار Agisoft.Photoscan استفاده شد. در این نرم‌افزار، تصاویر برداشت شده با پهپاد با توجه به مختصات خود که توسط gps پهپاد ثبت می‌شود، مطابق شکل ۲ کنار هم قرار گرفته و موزاییک می‌گردند و بدین ترتیب، نقشه منطقه با اعمال یک سری پردازش‌های لازم تهیه می‌شود.



شکل ۲- نحوه چینش تصاویر در نرم‌افزار Agisoft.

در روز ۱۱ آذر سال ۱۳۹۷، تعداد ۷۶۱ تصویر به کمک پهپاد DJI Phantom3 Professional با فرمت JPEG از منطقه طرح تهیه گردید. برای این کار، پهپاد مذکور با استفاده از نرم‌افزار Pix4d Capture، به صورت خودکار بر فراز منطقه به پرواز درآمد. با توجه به شرایط منطقه، همپوشانی بین تصاویر ۶۰ درصد و ارتفاع پرواز نیز ۵۰ متر تنظیم شد. تهیه نقشه توسط نرم‌افزار Agisoft.Photoscan به صورت مدل رقومی ارتفاع صورت

2. Resolution
3. Pixel



۱. پرنده هدایت‌پذیر از دور

گرفت و سایز پیکسل‌های نقشه ۴ سانتی‌متر تنظیم شد. برای تعیین محل خروج آب در هر بخش از منطقه مورد مطالعه، باید حوضه‌بندی صورت گیرد. بدین منظور، به کمک مدل رقومی ارتفاع، حوضه‌بندی منطقه در محیط GIS انجام شد و سپس خطوط جریان آب ترسیم گردید.

### تعیین میزان تقاضای آب غیرشرب

با توجه به این که آب باران استحصال از سطوح کف خیابان به دلیل رفت و آمد انسان و وسایل نقلیه و نیز به دلیل تأثیر سایر منابع آلوده کننده، از کیفیت پایینی برخوردار است، لذا در این مطالعه آب استحصال از این سطوح صرف تأمین نیاز آبی فضای سبز دانشکده می‌گردد. بدین ترتیب، شبیه‌سازی مخازن تعبیه شده در سطوح خیابان، با توجه به تأمین نیاز آبی درختان و فضای سبز اطراف خود صورت می‌گیرد. برای محاسبه میزان نیاز آبی فضای سبز، تعداد درخت‌ها باید تعیین گردد. با توجه به این که درختان موجود در دانشکده از گونه‌های مختلف و در سنین مختلف بوده و همچنین وضعیت فضای سبز دانشکده غیراستاندارد است، لذا در این مطالعه با توجه به تجارب قبلی، نیاز آبی هر درخت به طور متوسط ۶ لیتر در روز و نیاز آبی یونجه و چمن، ۵ میلی‌متر در روز روی سطح کشت در نظر گرفته شد. درختان و فضای سبز در طول فصول بارش نیاز به آبیاری ندارند. اما برای جلوگیری از ایجاد رواناب و هدررفت آب، فرض شد که نیاز در طول سال ثابت است و آب ذخیره شده در مواقع بارش را می‌توان برای تأمین سایر مصارف غیرشرب به کار برد.

### مدل‌سازی مخازن سطوح آبیگیر

از بین تکنیک‌های مختلفی که به منظور تجزیه و تحلیل سامانه‌های استحصال آب باران ارائه شده‌اند، روش مدل‌سازی تراز روزانه آب<sup>۱</sup> به دلیل سادگی تفسیر، دقت بالا و نیز پذیرش عمومی بهتر، انتخاب مناسب‌تری است (۳). این مدل، از داده‌های روزانه بارش به عنوان منبع اولیه برای تأمین نیاز فضای سبز 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 شود. از این مدل در تحقیقات گذشته از جمله رحمان و همکاران (۱۹)؛ مهرآبادی و همکاران (۱۷)؛ ایتمیزی و همکاران (۱۰) و جینگ و همکاران (۱۱) نیز استفاده شده است.

در این مقاله، مدل‌سازی سامانه استحصال آب باران در محیط نرم افزار متلب<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد. مرحله اول در این مدل‌سازی، برآورد مقادیر حجم آب استحصال از سطح آبیگیر در هر روز به صورت زیر است:

$$I_t = R_t \times A \times \phi \quad (1)$$

در این معادله، I حجم روزانه رواناب قابل استحصال (لیتر)، R عمق روزانه بارش (میلی‌متر)، A مساحت سطح آبیگیر (متر مربع) و  $\phi$  ضریب

رواناب (بدون بعد) است. در تحقیقات قبلی، ضریب رواناب برای سطوح آسفالت به طور متوسط ۰/۸ توصیه شده است، ولی ضریب مذکور با توجه به وضع موجود سطوح آسفالت دانشکده و شیب ملایم آن، غیرمعقول به نظر می‌رسد. بنابراین در این تحقیق، ضریب رواناب این سطوح ۰/۵ در نظر گرفته شد. حجم آب موجود در مخزن در هر روز با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است (۱۷):

$$V_t = I_t + V_{t-1} - O_t - SP_t \quad (2)$$

$V_t$  حجم ذخیره آب مخزن در روز t (لیتر)،  $I_t$  حجم آب باران استحصال شده از سطح آبیگیر 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 فضای سبز در روز t (لیتر) و  $SP_t$  حجم سرریز از مخزن در روز t (لیتر) می‌باشند.

در شبیه‌سازی سامانه 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:

$$SP_t = I_t + V_{t-1} - V_{max} - O_t \quad (3)$$

در این معادله،  $SP$  حجم سرریز از مخزن (لیتر) و  $V_{max}$  حجم مخزن (لیتر) است.

با استفاده از رابطه زیر نیز می‌توان نسبت سرریز (نسبت کل حجم آب سرریز شده به کل حجم آب دریافت شده) از مخزن را محاسبه کرد:

$$OFR = \frac{\sum_{t=1}^n SP_t}{\sum_{t=1}^n I_t} \times 100 \quad (4)$$

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 است.

### برآورد قابلیت اطمینان مخازن آب باران

قابلیت اطمینان<sup>۳</sup> درصدی از روزهای سال است که با استفاده از آب باران می‌توان تمام نیاز آبی فضای سبز را پاسخ داد که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد (۹):

$$Re = \frac{N-U}{N} \times 100 \quad (5)$$

که در آن، U تعداد روزهایی از سال که نیاز فضای سبز در شرایط مورد نظر تأمین نمی‌گردد و N تعداد کل روزها در یک سال خاص است. به منظور برآورد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز سامانه استحصال آب باران در منطقه مورد مطالعه طرح، داده‌های در دسترس بارش روزانه ایستگاه سینوپتیک چیتگر از روز اول ژانویه سال ۱۹۹۶ تا روز ۳۱ دسامبر سال ۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده و پارامترهای

3. Reliability

1. Daily Water Balance Modelling Technique  
2. Matlab

هزینه را به کمک شاخص ارزش کنونی خالص (NPV)<sup>۲</sup> به سال صفر تبدیل کرده و حجمی از مخزن که بیشترین NPV را داشته باشد، به عنوان حجم بهینه مخزن انتخاب می‌گردد. درآمد سامانه‌های استحصال آب باران وابسته به حجم آب ذخیره شده است. معادله زیر تابع هدف مسأله را نشان می‌دهد.

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^T \frac{B_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

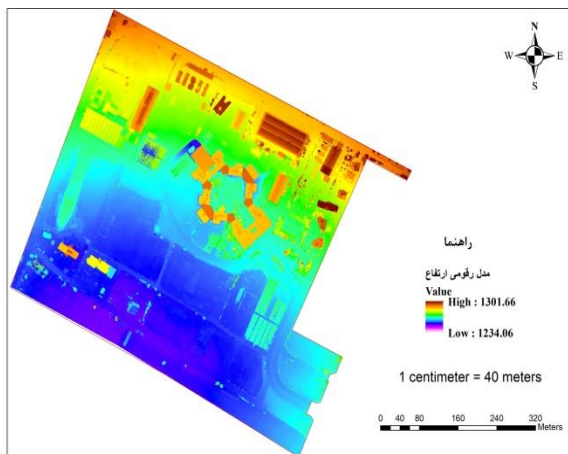
در این معادله، IC هزینه اولیه خرید مخزن، Bt سود سالانه طرح که وابسته به حجم آب ذخیره شده است، t سال مورد نظر و i نرخ بهره است. با توجه به روند افزایش سالانه قیمت آب، درآمد حاصل از پروژه نیز افزایش خواهد یافت. قیمت آب در سال مورد نظر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_t = P_0 \times (1 + g)^t \quad (7)$$

که در آن، P<sub>0</sub> قیمت آب در سال اول، g درصد افزایش سالانه قیمت آب و t سال مورد نظر است.

### یافته ها

با توجه به ضرورت وجود نقشه منطقه در طراحی سامانه‌های استحصال آب باران، نقشه مذکور با استفاده از تصویربرداری با پهپاد تهیه شد. شکل ۴ بیانگر مدل رقومی ارتفاع دانشکده است که به کمک نرم‌افزار Agisoft.Photoscan به دست آمده است. این شکل، حدود ۶۵ متر اختلاف ارتفاع در دانشکده مذکور را نشان می‌دهد که بیشترین ارتفاع مربوط به پشت‌بام یک ساختمان و کمترین ارتفاع مربوط به پارکینگ زیرزمینی است.

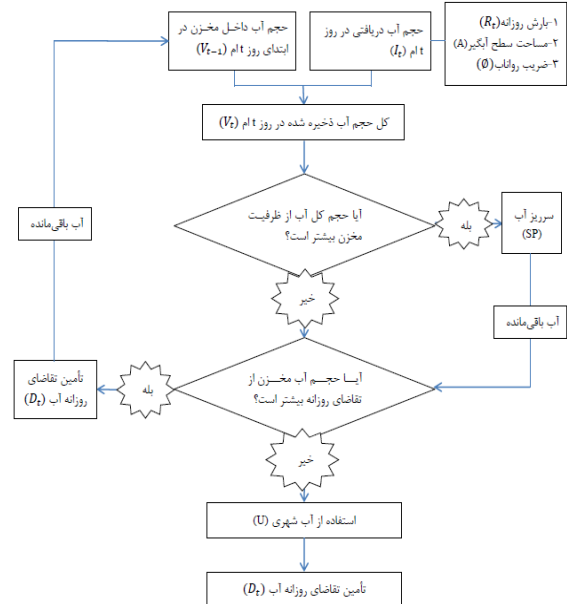


شکل ۴- مدل رقومی ارتفاع دانشکده.

### حوضه‌بندی منطقه

شکل ۵ نقشه حوضه‌بندی سطوح آسفالت دانشکده و شبکه جریان<sup>۳</sup> را نشان می‌دهد. با توجه به وضعیت توپوگرافی سطوح خیابان دانشکده،

قابلیت اطمینان و نسبت سرریز به ازای حجم‌های مختلف مخازن برآورد گردید. شکل ۳ نمودار گردش شبیه‌سازی سامانه استحصال آب باران در محیط متلب را نشان می‌دهد که در آن از روابط ۱ تا ۵ استفاده گردید. طبق این شبیه‌سازی، تعداد کل روزهایی که سامانه استحصال آب باران می‌تواند تقاضای مورد نظر را برآورد نماید، به دست آمد که با جایگذاری در رابطه ۵، درصد قابلیت اطمینان برای هر یک از مخازن محاسبه شد.



شکل ۳- نمودار گردش شبیه‌سازی سامانه استحصال آب باران.

### بهینه‌سازی حجم مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۱</sup>

طراحی سامانه‌های استحصال آب باران باید بر مبنای اصول مهندسی صورت گیرد. به طوری که ملاک طراح، تنها ذخیره بیشتر آب نباشد، بلکه باید با بهینه‌سازی حجم مخازن، علاوه بر ذخیره بیشتر آب، سامانه توجیه اقتصادی نیز داشته باشد. هرچه حجم مخزن بیشتر باشد، حجم آب ذخیره شده و در نتیجه درآمد حاصل از اجرای سامانه نیز بیشتر خواهد بود. از طرفی، با افزایش حجم مخزن، هزینه خرید آن نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین باید حجمی از مخزن انتخاب گردد که اختلاف بین درآمد و هزینه آن (سود) حداکثر ممکن باشد. یکی از روش‌های تعیین حجم بهینه مخازن، بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب و با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. برای حل یک مسأله به وسیله الگوریتم ژنتیک، باید آن را به فرم مخصوص مورد نیاز این الگوریتم تبدیل نمود. بنابراین باید یک تابع هدف تعریف کرد. در این مطالعه، تابع هدف مسأله بهینه‌سازی سود است. 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

3. Stream Network

1. Genetic Algorithm  
2. Net Present Value

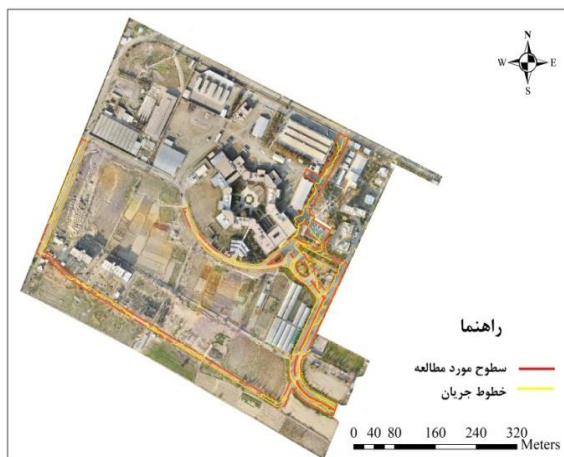


### نتایج قابلیت اطمینان و نسبت سرریز

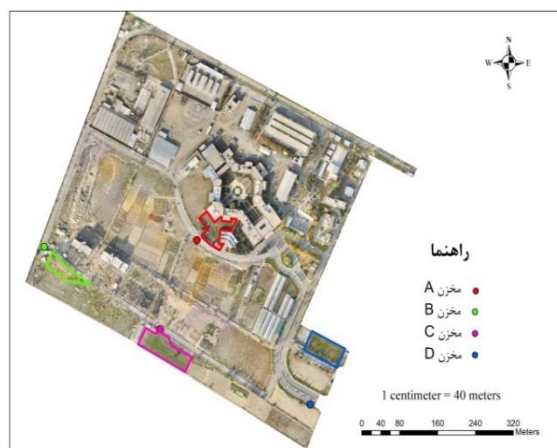
شکل ۷ نمودار قابلیت اطمینان و شکل ۸ نسبت سرریز را برای ۴ مخزن مذکور نشان می‌دهند.

با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که در خیابان A، بیشترین تعداد روزهایی که آب باران استحصالی از سطح این خیابان می‌تواند نیاز فضای سبز اطراف خود را تأمین کند، برابر با ۵۷/۸۵ درصد است و کمترین درصد مربوط به مخزن ۱ مترمکعبی است که برابر با ۱۳/۶۴ درصد است. از بین خیابان‌های بررسی شده، کمترین قابلیت اطمینان مربوط به خیابان C است، به طوری که در این خیابان، بیشترین تعداد روزهایی که آب باران استحصالی از آن می‌تواند نیاز روزانه فضای سبز اطراف خود را تأمین کند، برابر با ۲/۷۳ درصد و کمترین درصد تأمین این نیاز آبی، برابر با ۲/۰۹ درصد از روزهای سال است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش حجم مخازن، درصد روزهایی که آب باران می‌تواند پاسخگوی نیاز آبی باشد، افزایش می‌یابد که شیب این افزایش پیوسته در حال کم شدن است که این نتیجه همسو با نتایج تحقیقات مهرآبادی و همکاران (۱۷)، لانی و همکاران (۱۴) و بشار و همکاران (۳) است. همچنین با توجه به شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که در همه خیابان‌ها با افزایش میزان تقاضای آب، درصد قابلیت اطمینان مخازن کمتر می‌گردد که این نتیجه با نتایج تحقیقات مهرآبادی و همکاران (۱۷) و بشار و همکاران (۳) مطابقت دارد. بر این اساس و با توجه به تقاضای آب نسبتاً پایین در خیابان B، می‌توان به قابلیت اطمینان بالایی دست یافت، به طوری که با استفاده از یک مخزن ۰/۱ مترمکعبی، در ۲۰/۴۳ درصد از روزهای سال، تمام نیازهای آبی فضای سبز اطراف خیابان مذکور را می‌توان با استفاده از آب باران تأمین کرد که این میزان در صورت استفاده از مخزن ۲۰ مترمکعبی به ۶۴/۳۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل تقاضای نسبتاً کم آب، بخش اعظمی از رواناب سطح آبیگر این ساختمان تبدیل به سرریز می‌گردد. به طوری که با استفاده از مخزن ۱ مترمکعبی و ۲۰ مترمکعبی، به ترتیب ۸۵/۴۴ درصد و ۶۱/۷۴ درصد سرریز وجود خواهد داشت. با توجه به شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت که هرچقدر حجم مخزن بزرگ‌تر در نظر گرفته شود، نسبت سرریز روند نزولی خواهد داشت، تا جایی که دیگر سرریزی وجود نداشته باشد که این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات بشار و همکاران (۳) هم‌خوانی دارد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، در خیابان C، با توجه به حجم بالای تقاضا، نسبت سرریز به مراتب کمتر از سایر خیابان‌ها است. در صورت استفاده از یک مخزن ۱ مترمکعبی در خیابان C، ۱۹/۸۹ درصد از کل آب استحصالی، سرریز می‌گردد که این مقدار در صورت جایگزینی مخزن ۲۰ مترمکعبی، به ۶/۳۵ درصد نزول پیدا خواهد کرد.

رواناب حاصل از آن‌ها قابل جمع‌آوری در یک مخزن نیست، لذا ۴ عدد مخزن A، B، C و D در نقاط مختلف سطوح خیابان‌ها در نظر گرفته شد. مناسب‌ترین محل استقرار مخازن با توجه به نقشه حوضه‌بندی منطقه و همچنین محدوده آبیاری هر مخزن در شکل ۶ نشان داده شده است. به منظور حذف هزینه‌های اضافی، همه مخازن به صورت زیرزمینی در نظر گرفته شدند تا رواناب به صورت ثقلی وارد مخازن شده و نیازی به خرید پمپ برای پمپاژ رواناب به داخل آن‌ها نباشد. این کار همچنین از اشغال فضا نیز جلوگیری می‌کند. البته برای توزیع آب مخازن به محل مصرف، نیاز به خرید پمپ می‌باشد. جدول ۱، سطوح مورد مطالعه را از نظر مساحت و میزان تقاضا تفکیک کرده است.



شکل ۵- نقشه حوضه‌بندی سطوح آسفالت دانشکده.



شکل ۶- محل نصب مخازن و محدوده آبیاری آن‌ها.

### جدول ۱- تفکیک سطوح مورد مطالعه.

محدوده	مساحت	محدوده آبیاری	تقاضا (لیتر)
A	۶۷۰۵	۱۸۰ اصله درخت	۱۰۸۰
B	۳۰۸۲	۱۰۰ اصله درخت	۶۰۰
C	۴۳۲۶	۳۹۲۰ متر مربع یونجه	۱۹۶۰۰
D	۱۳۳۸۶	۳۲۰۰ متر مربع چمن	۱۶۰۰۰

به شرح جدول ۳ است. طبق این جدول مشاهده می‌شود که در مخزن C با حجم ۱ مترمکعب، می‌توان سالانه حدود ۴۲۰ مترمکعب آب صرفه‌جویی کرد. اگر ملاک طراحی، ذخیره همه رواناب ورودی به مخازن باشد، حجم مخازن بزرگ‌تر در نظر گرفته شده و مقادیر جدول ۳ افزایش خواهند یافت. ولی با توجه به این که کاهش هزینه‌ها نیز مورد نظر است، حجم بهینه مخازن لحاظ شد که در این صورت، درصدی از رواناب نیز سرریز می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای حجم‌های بهینه مخازن می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای مختلفی در بهینه‌سازی حجم مخزن سامانه‌های استحصال آب باران حائز اهمیت می‌باشند که عبارتند از:

۱- مساحت سطح آبگیر: افزایش مساحت سطح آبگیر موجب افزایش کارایی سامانه استحصال آب باران می‌گردد. در صورتی که مساحت سطح آبگیر زیاد باشد، رواناب ایجاد شده نیز زیاد بوده و برای کاهش حجم سرریز از مخازن، حجم مخزن باید بزرگ‌تر در نظر گرفته شود.

۲- تقاضای آب: در صورتی که تقاضای داخلی آب کم باشد، با افزایش مساحت سطح آبگیر تغییرات محسوسی در حجم مخزن به‌وجود نمی‌آید ولی اگر تقاضا زیاد باشد، با افزایش مساحت سطح آبگیر، حجم مخزن دچار تغییرات زیادی می‌گردد.

۳- هزینه خرید مخزن: با افزایش حجم مخزن، هزینه خرید و مقدار رواناب قابل ذخیره نیز افزایش می‌یابند و حجمی از مخزن که بیشترین سوددهی را داشته باشد، به عنوان حجم بهینه در نظر گرفته می‌شود. انتخاب بهینه حجم مخزن موجب افزایش سود و افزایش راندمان سامانه‌های استحصال آب باران شده و هزینه‌های اجرایی زودتر جبران می‌گردند که این نتیجه با نتایج تحقیقات مون و هان (۱۸) مطابقت دارد.

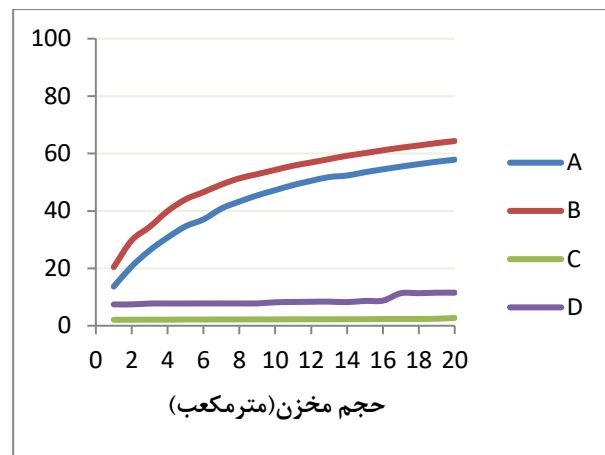
۴- قیمت آب شهری: افزایش قیمت آب شهری، توجیه‌پذیری اقتصادی سامانه‌های استحصال آب باران را بیشتر می‌کند. با توجه به قیمت کم آب در ایران در مقایسه با هزینه خرید مخزن، در بهینه‌سازی حجم مخازن، اغلب مخازن با حجم پایین پیشنهاد می‌گردد. همچنین به دلیل پایین بودن قیمت آب در کشور، نسبت درآمد به هزینه کم شده که این نتیجه همسو با نتایج کیم و یو (۱۳) است.

جدول ۲- مقادیر حجم بهینه مخازن.

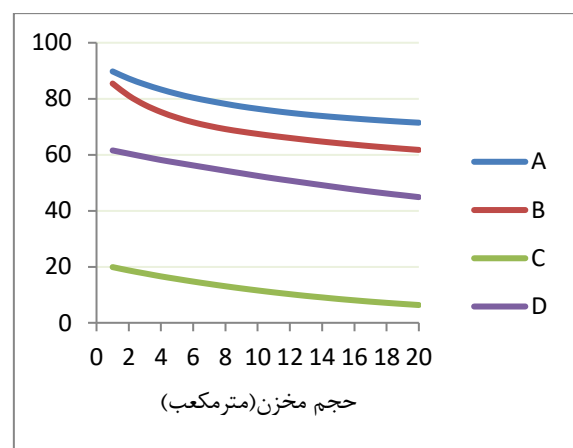
خیابان	حجم بهینه (مترمکعب)
A	۶/۱۵
B	۳/۴۶
C	۱
D	۲۰

جدول ۳- میزان صرفه‌جویی سالانه در مصرف آب.

خیابان	درصد صرفه‌جویی	حجم صرفه‌جویی (لیتر)
A	۴۰/۵۴	۱۵۹۸۰۹
B	۳۷/۹۳	۸۳۰۶۶



شکل ۷- درصد قابلیت اطمینان مخازن.



شکل ۸- نسبت سرریز از مخازن.

## نتایج بهینه‌سازی حجم مخازن

بهینه‌سازی حجم مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. برای این کار، هزینه اولیه خرید مخزن بر اساس قیمت رایج بازار تعیین شد. بدین صورت که رابطه‌ای بین حجم مخازن و قیمت آن‌ها به دست آمد. همچنین قیمت هر مترمکعب آب برابر ۱۰۰۰ تومان، نرخ بهره ۱۸ درصد، نرخ سالانه رشد قیمت آب برابر با ۲۰ درصد و طول عمر مخازن ۴۰ سال تعیین گردید. همچنین با توجه به هدف تحقیق که ذخیره هر چه بیشتر آب است، محدودیتی برای حجم مخازن در نظر گرفته نشد. نتایج بهینه‌سازی حجم مخازن مطابق جدول ۲ است. با توجه به مساحت نسبتاً کم سطح آبگیر متصل به مخزن C، حجم رواناب ورودی به این مخزن کم می‌باشد. از طرفی، تقاضا برای آب از این مخزن بسیار زیاد است. لذا رواناب ورودی به مخزن در هر روز، در همان روز مصرف شده و نیازی به نصب مخازن حجیم‌تر برای ذخیره آب برای روز بعد نیست. بنابراین حجم بهینه این مخزن برابر با ۱ مترمکعب شد. همچنین با توجه به این که مساحت سطح آبگیر متصل به مخزن D بسیار زیاد می‌باشد، لذا حجم رواناب ورودی به این مخزن زیاد است و باید از مخزن با حجم بالا استفاده شود تا بتواند این حجم آب را ذخیره کرده و به محل مصرف برساند. با توجه به حجم بهینه مخازن، میزان صرفه‌جویی در مصرف آب شرب در هر یک از سطوح

نخواهد داشت و استفاده از مخازن با حجم بیشتر از آن، مقرون به صرفه نخواهد بود.

C	۵/۸۸	۴۲۰۶۵۵
D	۱۵/۳۴	۸۹۵۸۵۶

### ملاحظات اخلاقی

#### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در مطالعه حاضر فرم‌های رضایت نامه آگاهانه توسط تمامی آزمودنی‌ها تکمیل شد.

#### حامی مالی

هزینه‌های مطالعه حاضر توسط دانشگاه تربیت مدرس تامین شد.

#### مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده پردازی: هادی شوکتی، مهدی کوچک زاده، علی اکبر نوروزی؛ روش شناسی و تحلیل داده‌ها: هادی شوکتی، مهدی کوچک زاده، علی اکبر نوروزی؛ نظارت و نگارش نهایی: هادی شوکتی.

#### تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

### نتیجه گیری

در این مقاله به برآورد قابلیت اطمینان و نسبت سرریز از مخازن سامانه‌های استحصال آب باران و در نهایت مراحل طراحی سامانه‌های مذکور از جمله تعیین مسیر رواناب، تعیین محل نصب مخازن و حجم بهینه مخازن پرداخته شد. نتایج به شرح زیر است:

- با افزایش حجم مخزن، درصد قابلیت اطمینان نیز روند صعودی خواهد داشت که پیوسته از شیب منحنی کاسته می‌شود، تا جایی که درصد قابلیت اطمینان بعد از یک حجم مخزن، به یک عدد ثابت میل می‌کند که استفاده از مخازن با حجم بزرگتر از این مقدار، صرفه اقتصادی نخواهد داشت.

- با افزایش میزان تقاضای آب، درصد قابلیت اطمینان مخازن آب باران کاهش می‌یابد و مخازن آب باران، در درصد کمتری از روزهای سال قادر به تأمین تقاضای آب خواهد بود.

- هرچقدر حجم مخازن مورد استفاده بیشتر باشد، نسبت سرریز کاهش می‌یابد، به طوری که بعد از یک حجم مخزن، دیگر سرریزی وجود

### References

1. Tabatabai Yazdi J, Tavakkoli H. Evaluation of the possibility of rainwater harvesting to supply the part of the water required for green space in Mashhad. Agricultural and natural resources research center. 2011.  
<https://www.daneshgahi.com/p/tl/pbl-et.aspx?tid=2004073>
2. Assayed A, Hatokay Z, Al-Zoubi R, Azzam S, Qbailat M, Al-Ullyan A, Bushnaq S, Maroni R. On-site rainwater harvesting to achieve household water security among rural and peri-urban communities in Jordan. Conservation and Recycling. 2013; 73:72-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.010>
3. Bashar MZI, Karim MR, Imteaz MA. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: a comparative study within six major cities of bangladesh. Resources. Conservation and Recycling . 2018; 133:146-154.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.025>
4. Basinger M, Montalto F, Lall U. A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. Hydrology. 2010; 392:105-118.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.039>
5. Cowden JR, Watkins JR, David W, Mihelcic JR. Stochastic rainfall modeling in West Africa: Parsimonious approaches for domestic rainwater harvesting assessment. Hydrology. 2008; 361:64-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.025>
6. Fewkes A. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. Building and Environment. 1999; 34:765-772.  
[https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(98\)00063-8](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(98)00063-8)
7. Guo Y, Baetz BW. Sizing of rainwater storage units for green building

- applications. *Hydrologic Engineering*. 2007; 12: 197-205.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2007\)12:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:2(197))
8. Hanson LS, Vogel RM. Generalized storage-reliability-yield relationships for rainwater harvesting systems. *Environmental Research Letters*. 2014; 9:075007.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/075007>
  9. Imteaz MA, Adeboye OB, Rayburg S, Shanableh A. Rainwater harvesting potential for southwest nigeria using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012; 62:51-55.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.007>
  10. Imteaz MA, Matos C, Shanableh A. Impacts of climatic variability on rainwater tank outcomes for an inland city, Canberra. *Hydrology Science and Technology*. 2014; 4:177-191.  
[\[DOI: 10.1504/IJHST.2014.067730\]](https://doi.org/10.1504/IJHST.2014.067730)
  11. Jing X, Zhang S, Zhang J, Wang Y, Wang Y. 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*. 2017; 126:74-85.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027>
  12. Jones MP, Hunt WF. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*. 2010; 54:623-629.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.002>
  13. Kim K, Yoo C. Hydrological modeling and evaluation of rainwater harvesting facilities: case study on several rainwater harvesting facilities in Korea. *Hydrologic Engineering*. 2009; 14:545-561.  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000030](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000030)
  14. Lani NHM, Syafiuddin A, Yusop Z, Bin Mat Amin MZ. 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*. 2018; 636:1171-1179.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.418>
  15. Li Y, Ye Q, Liu A, Meng F, Zhang W, Xiong W, Wang P, Wang C. Seeking urbanization security and sustainability: Multi-objective optimization of rainwater harvesting systems in China. *Hydrology*. 2017; 550:42-53.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.042>
  16. Liaw CH, Tsai YI. Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use 1. *The American Water Resources Association*. 2004; 40:901-912.  
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01054.x>
  17. Mehrabadi MHR, Saghafian B, Fashi F. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013; 73:86-93.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.015>
  18. Mun JS, Han MY. Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: definition, sensitivity and verification. *Environmental Management*. 2012; 93:147-153.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.08.024>
  19. Rahman A, keane J, Imteaz MA. Rainwater harvesting in greater Sydney: water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*. 2012; 61:16-21.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.002>
  20. Rostad N, Foti R, Montalto FA. Harvesting rooftop runoff to flu sh

toilets: Drawing conclusions from four major US cities. Resources, Conservation and Recycling. 2016; 108:97-106.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.009>

21. Sample DJ, Liu J. Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. Cleaner Production. 2014; 75:174-194.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.075>

22. Walsh TC, Pomeroy CA, Burian SJ. Hydrologic modeling analysis of a passive, residential rainwater harvesting program in an urbanized, semi-arid watershed. Hydrology. 2014; 508:240-253.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.038>

23. Wang R, Zimmerman JB. Economic and environmental assessment of office building rainwater harvesting systems in various US cities. Environmental Science and Technology. 2015; 49:1768-1778.

<https://doi.org/10.1021/es5046887>