



Optimization of Rainwater Storage Tanks for Building (Case Study: Guilan_Rasht)

S. Nojumi Siahmard¹, B. Shafiei Sabet^{2*},
and S. Janatrostami³

Abstract

Rasht is one of the richest cities in rainfall in Iran, and because of collecting rain from the roof of the buildings a considerable amount of water can be stored, then designing and implementing of rainwater collection systems in Rasht can collect and save a significant amount of rainwater for usages like: green-space irrigation or Non-drinkable usages as whole. The catchment bank (rainwater storage bank) is the most important and expensive component of Rainwater Harvesting System (RWH) implementation on the roof of residential buildings. The reliability of these storage banks was estimated between 100% and 82% in three years of wetness, drought and normal index. The demand amount of this research is considered equal to the water needed for the irrigation of the cultivated grass in the green space of each building in the hot seasons. Then, we have estimated the optimum volume of storage bank using mixed integer linear programming method in LINGO.17 software for each of the buildings considering the expected reliability coefficient of the storage banks (70, 80 and 90%). These volumes are between 1.18 and 13.49 cubic meters in three years of wetness, drought and normal index with different reliabilities. Finally, we have estimated the storage bank volume of each demand for one of the roofs in different demands and the results were calculated between 0.55 and 5.26 cubic meters.

Keywords: Rainwater, Tank, Building Roof, RWH, LINGO.17.

Received: November 6, 2018

Accepted: November 1, 2019

بهینه‌سازی مخازن ذخیره‌سازی آب باران جمع‌آوری شده از بام ساختمان‌ها (مطالعه موردی: شهر رشت)

سمانه نجومی سیاهمرد^۱، بهنام شفیعی ثابت^{۲*}
و سمیه جنت‌رستمی^۳

چکیده

رشت یکی از شهرهای پر باران ایران است و با توجه به این که با جمع‌آوری آب باران از سطح بام ساختمان‌ها، مقدار قابل ملاحظه‌ای آب ذخیره می‌شود، طراحی و اجرای سیستم جمع‌آوری آب باران در شهر رشت می‌تواند منبع جدیدی برای آبیاری فضای سبز و مصارف غیر شرب شهری ایجاد نماید. در یک سامانه استحصال آب باران (RWH) از بام منازل مسکونی، مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین جزء، مخزن ذخیره‌سازی آب باران است. بنابراین انتخاب مخزنی با ابعاد مناسب دارای اهمیت است. در این تحقیق با در نظر گرفتن چهار بام با مساحت‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مترمربع در شهر رشت، با توجه به فضای در دسترس و مقدار تقاضا، برای هر یک از بام‌ها مخزنی با حجم مشخص به ترتیب برابر با ۵، ۶، ۸ و ۱۰ مترمکعب انتخاب و نحوه عملکرد و امکان‌سنجی هر یک از مخازن با در نظر گرفتن مساحت بام، ضریب رواناب پوشش بام، بارندگی روزانه و میزان تقاضای روزانه، مورد بررسی قرار گرفت. ضریب اعتمادپذیری این مخازن در سه سال شاخص ترسالی، نرمال و خشکسالی بین ۱۰۰ تا ۸۲ درصد برآورد شد. میزان تقاضا برابر با آب مورد نیاز برای آبیاری چمن کشت شده در فضای سبز هر یک از ساختمان‌ها در فصول گرم سال در نظر گرفته شده است. سپس برای هر یک از ساختمان‌ها با در نظر گرفتن ضریب اعتمادپذیری مورد انتظار از مخازن (۷۰، ۸۰، ۹۰ درصد)، حجم بهینه مخزن با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح در نرم‌افزار LINGO.17 برآورد شده است. این احجام در سه سال شاخص ترسالی، نرمال و خشکسالی با اعتمادپذیری‌های مختلف، در محدوده ۱/۱۸ تا ۱۳/۴۹ مترمکعب برآورد شده است. همچنین برای یکی از بام‌ها، با چند میزان تقاضای متفاوت که در طول دوره ثابت در نظر گرفته شد، حجم مخزن برای هر یک از میزان تقاضاها بین ۰/۵۵ تا ۵/۲۶ مترمکعب تعیین شده است.

کلمات کلیدی: آب باران، مخزن، بام ساختمان، RWH، LINGO.17.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۸/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۸/۱۰

1- M.Sc., Hydraulic Structures, Water Engineering Department, University of Guilan, Iran.

2- Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Guilan, Iran. Email: shafiei@guilan.ac.ir

3- Assistant Professor, Water Engineering Department, University of Guilan, Iran.

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه گیلان.

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان.

۳- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکان‌پذیر است.

امروزه فشار بر منابع آب موجود با توجه به تغییرات آب و هوایی و افزایش تقاضای آب برای توسعه کشاورزی و شهری روند افزایشی دارد (Adham et al., 2016). یکی از راه‌هایی که از گذشته همواره مورد توجه بوده، روش سنتی جمع‌آوری آب باران و استفاده از سامانه‌های سطوح آبیگر باران (RWH¹) است که در آن با استفاده از سطوحی نظیر پشت‌بام تا حدود زیادی آب باران در محل ریزش ذخیره می‌شود. استفاده از این سطوح، علاوه بر تأمین بخشی از نیاز آبی می‌تواند با کنترل رواناب شهری، حرکتی در جهت توسعه پایدار مناطق شهری باشد. در این روش معمولاً آب باران از سطوح غیرقابل نفوذ نظیر بام ساختمان‌ها جمع‌آوری و در مخازنی ذخیره می‌شود تا به‌عنوان منبع آب مکمل مورد استفاده قرار گیرد. این آب معمولاً جهت مصارف غیرشرب همانند آبیاری فضای سبز یا شستشوی محوطه بیرون ساختمان و مصارف غیرآشامیدنی داخل ساختمان استفاده می‌گردد (Sample and Liu, 2014). عوامل اصلی در طراحی یک سامانه سطوح آبیگر (RWH) عبارت از بارندگی، مساحت سطح جمع‌آوری کننده باران، ضریب رواناب، حجم مخزن ذخیره‌سازی و مقدار تقاضای آب است (Mun and Han, 2012). مخزن ذخیره‌سازی که گاهی اوقات آب انبار نامیده می‌شود، جز اصلی و معمولاً گرانترین قسمت RWH است، زیرا اکثر ساختمان‌ها دارای بام و ناودان می‌باشند و برای استفاده از RWH تنها نیاز به یک مخزن مناسب دارند (Kinkade-Levario, 2007). امروزه جستجو و تحقیق برای پیدا کردن مخزن مناسب ارزان‌تر، یک چالش در جوامع است. هزینه یک مخزن بستگی به اندازه، نوع و کمیت مصالح مصرفی در ساخت، نیروی کار مورد نیاز جهت ساخت و در بعضی مناطق لزوم استفاده از تجهیزات ویژه دارد (RHRG, 2001).

تاکنون مدل‌های مختلفی برای جمع‌آوری آب باران و همچنین بهینه‌سازی مخزن ذخیره‌سازی آب باران پیشنهاد شده است. تکنیک‌های بهینه‌سازی در خلال چند دهه اخیر اهمیت زیادی در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم پیچیده مخازن داشته‌اند (Qaderi et al., 2010). Ward et al. (2010) مناسب بودن برخی از مدل‌ها را برای کاربرد مصارف خانگی مورد ارزیابی قرار دادند. مطالعات Campisano and Modica (2012) نشان داد که امکانات سیستم RWH به طور کامل به مشخصات مخزن ذخیره‌سازی آب باران، الگوی مصرف آب در خانواده‌ها، سطح مؤثر (مساحت) پشت بام ساختمان‌ها و مشخصات بارش در محل بستگی دارد. Okoye et al. (2015) با استفاده از اطلاعات میدانی در قبرس شمالی، یک مدل یکپارچه‌ی بهینه‌سازی را بر اساس برنامه‌ریزی خطی برای اندازه‌ی

بهینه‌ی مخزن جمع‌آوری و نگاه‌داری آب باران در یک واحد مسکونی ارائه نمودند. آن‌ها همچنین راهکارهای مدیریتی مشخصی در مورد پارامترهای تأثیرگذار بر اندازه‌ی بهینه‌ی مخزن ذخیره‌سازی پیشنهاد دادند. Lee et al. (2016) پتانسیل جمع‌آوری آب باران را در مالزی تحت تغییرات آب و هوایی مورد بررسی قرار دادند و مسائل مربوط به محیط زیست، سیاست، اقتصاد و همچنین عوامل اجتماعی و فنی را بعنوان چالش‌های جمع‌آوری آب باران نام بردند و پیش‌بینی نمودند که جمع‌آوری آب باران به عنوان یک منبع آب جایگزین نقش مهمی ایفا خواهد کرد. همچنین برای ترویج این سیستم بر ضرورت همکاری دولت و شرکت‌های ذینفع تأکید کردند. Silva and Ghisi (2016) حساسیت متغیرهای طراحی و عدم اطمینان تقاضای آب شرب روزانه بر عملکرد سیستم‌های جمع‌آوری آب باران در ساختمان‌های مسکونی را مورد تحلیل قرار دادند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری RWH، حساسیت تحلیل‌ها با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر واریانس را برای شناسایی مهم‌ترین پارامترهای طراحی سیستم‌های استحصال سطوح آبیگر در ارزیابی پتانسیل صرفه‌جویی در آب آشامیدنی و اندازه ظرفیت مخزن زیرزمینی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که متغیرهای طراحی متفاوت از قبیل تقاضای آب آشامیدنی، تعداد ساکنان، تقاضای آب باران و سطح بام برای دستیابی به ظرفیت بهینه مخزن زیرزمینی و ارزیابی پتانسیل برای صرفه‌جویی در مصرف آب، دارای اهمیت است که منظور کردن تغییرات تقاضای آب آشامیدنی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های جمع‌آوری باران غیرممکن است، بنابراین در شبیه‌سازی کامپیوتری توزیع یکنواخت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. Rostad et al. (2016) در مطالعه‌ای با استفاده از روش موازنه جرم، عملکرد RWH را در چهار منطقه شهری ایالات متحده، از نظر تأثیر در ذخیره آب آشامیدنی و همچنین کاهش رواناب بام مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان دادند که یک سیستم RWH معمولی نصب شده در یک ساختمان با مساحت بام 100 m^2 و دارای مخزنی با حجم 5 m^3 می‌تواند نیاز به آب شیرین شهری را تا ۶۵٪ و رواناب تولید شده توسط بام را تا بیش از ۷۰٪ در شهرهای مورد بررسی کاهش دهد. Pelak and Porporato (2016) با در نظر گرفتن هزینه‌های ثابت و متغیر RWH و همچنین ماهیت تصادفی و متغیر میزان و زمان بارندگی، با تکیه بر مصارف غیر شرب خانگی، رابطه‌ای برای بهینه‌سازی مخزن سیستم ارائه دادند. Nguyen and Han (2017) برای حل مشکل کمبود داده‌های بارندگی روزانه، مدلی جهت برآورد مقدار بارندگی روزانه به کمک تعداد روزهای تر ماه ارائه دادند که پیش‌بینی عملکرد مدل RWH با استفاده از داده‌های تخمین زده شده توسط این مدل، بسیار نزدیک به داده‌های واقعی ارزیابی شده است. Ghahraman and Sepaskhah (2005) به کمک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دریافتند که با سنجش حجم آب مخزن در ابتدای

دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد و مساحت آن حدود ۱۳۶ کیلومتر مربع می‌باشد.

شهر رشت، به‌عنوان مرکز استان گیلان دارای آب و هوای معتدل کاسپین و شبه مدیترانه‌ای می‌باشد و دارای تابستان‌های گرم و شرجی و زمستان‌های سرد و مرطوب است. همچنین این شهر دارای رتبه اول میزان بارش مراکز استان‌های ایران می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه دوره مورد مطالعه ۲۰ ساله برابر با ۱۳۰۷/۸۴ میلی‌متر است. در شکل ۱ بارندگی سالانه هر یک از سال‌ها و متوسط بارندگی سالانه این دوره آورده شده است.

در این دوره زمانی، سال ۱۳۹۵ با میزان بارندگی سالانه‌ی ۱۴۷۱/۳ میلی‌متر به‌عنوان شاخص ترسالی، سال ۱۳۷۸ با میزان بارندگی سالانه ۱۳۰۲/۵ میلی‌متر به‌عنوان شاخص سال نرمال و سال ۱۳۸۸ با میزان بارش ۱۰۹۱/۶ میلی‌متر به‌عنوان شاخص خشک‌سالی انتخاب گردید. در این بخش، ابتدا از روش شاخص بارندگی، سال‌های نرمال، پرباران و خشک دوره ۲۰ ساله مشخص گردید و سپس با مقایسه میزان بارندگی نیمه اول هر سال در هر دسته، یک سال به‌عنوان سال شاخص برای انجام محاسبات انتخاب شد. شکل ۲ میزان بارش نیمسال اول را در سه سال شاخص نشان می‌دهد.

۲-۲- معادلات و روابط حاکم

چهار ساختمان مسکونی مستقل با مساحت بام و میزان تقاضای مشخص در مکانی خاص با متغیرهای هواشناسی مشخص و همچنین میزان فضای مناسب در دسترس برای جانمایی مخزن در نظر گرفته شده است. هدف از تعیین اندازه بهینه‌ی مخزن، طراحی مخزنی با حداقل هزینه‌ها است.

فصل زراعی و برآورد مناسبی از رژیم رودخانه و بارندگی در طی این فصل، که با تحلیل داده‌های تاریخی می‌تواند به‌دست آید، میزان آب بهینه در مخزن سد در انتهای فصل زراعی را می‌توان برآورد نمود.

در این مطالعه، طراحی RWH و بهینه‌سازی مخزن ذخیره‌سازی برای چهار ساختمان مسکونی نمونه در شهر رشت با مساحت بام‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مترمربع جهت تأمین تمام و یا بخشی از تقاضای آبی مربوط به آبیاری فضای سبز هر یک از ساختمان‌ها انجام شده است. با توجه به وضعیت اقلیمی و پراکندگی بارش در شهر رشت، گام زمانی مورد بررسی در این تحقیق، فصول گرم سال یعنی بهار و تابستان است، همچنین مساحت فضای سبز هر یک از ساختمان‌ها ۲۵٪ مساحت بام آن ساختمان و گیاه کشت شده در فضای سبز، چمن فرض شده است. از دو مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی (LP) و برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) استفاده شده است. در مدل‌سازی از روش LP، حجم بهینه‌ی مخزن ذخیره‌سازی آب باران برای جمع‌آوری تمامی آب باران جاری شده بر روی بام و در مدل‌سازی MILP حجم بهینه مخزن ذخیره‌سازی آب باران برای تأمین میزان تقاضا با درصد اعتمادپذیری مشخص، با در نظر گرفتن بارش روزانه و مساحت بام ساختمان‌ها تعیین شده است. همچنین در مدل‌سازی MILP برای بامی به مساحت ۱۰۰ مترمربع با نیازهای متفاوت که در طول دوره ثابت فرض شده و در سطوح اعتمادپذیری مختلف، حجم بهینه مخزن جمع‌آوری آب باران برآورد شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مشخصات اقلیمی منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، با توجه به آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی استان گیلان^۲، بارندگی روزانه شهر رشت به مدت ۲۰ سال از فروردین ۱۳۷۵ تا اسفند ۱۳۹۵ مورد بررسی قرار گرفت. شهر رشت در ۴۹ درجه و ۳۶

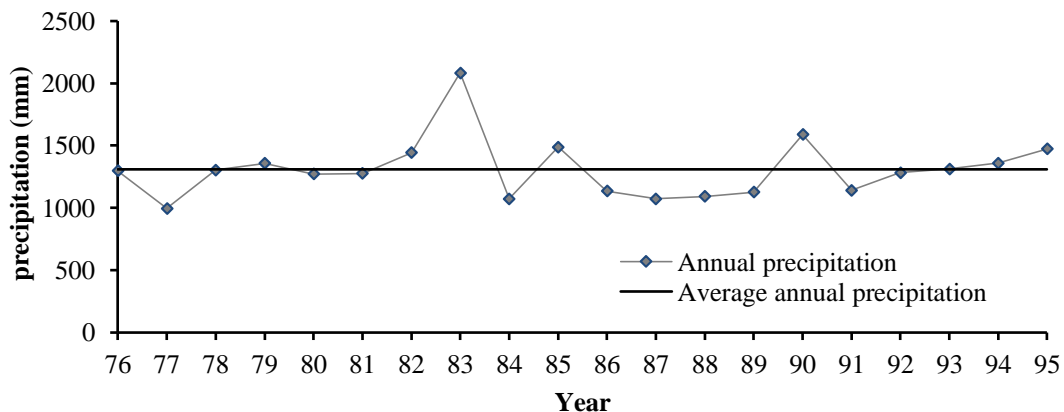


Fig. 1- Average rainfall of 20 years and Annual precipitation in Rasht

شکل ۱- متوسط بارندگی دوره ۲۰ ساله و بارندگی سالانه شهر رشت

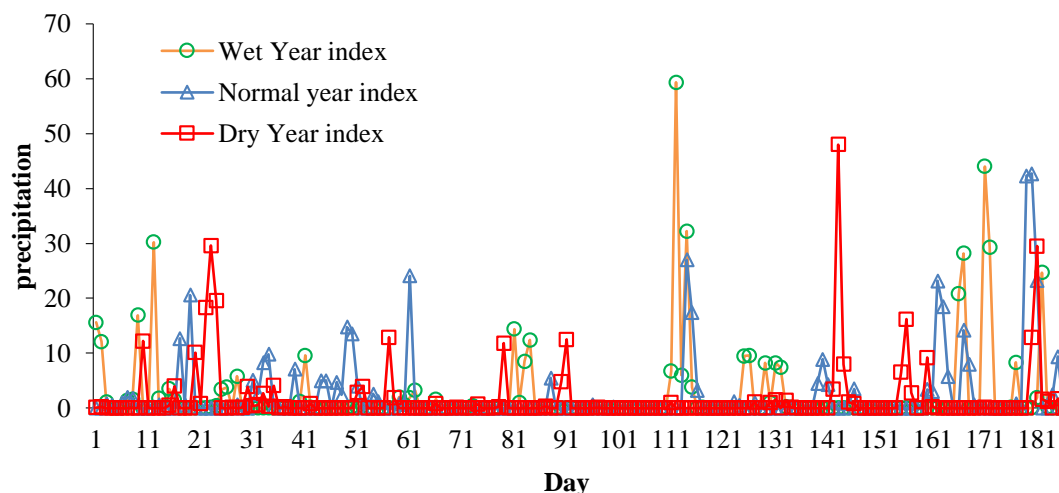


Fig. 2- Daily rainfall of the first semester of the three year index
 شکل ۲- منحنی بارندگی روزانه نیمسال اول سه سال شاخص ترسالی، نرمال و خشک‌سالی

آبیاری تکمیلی نمی‌باشد. بنابراین مدل‌سازی فقط برای فصول گرم یعنی بهار و تابستان انجام شده است. در ابتدا لازم است حجم آب قابل استحصال از بام، از رابطه ۱ بدست آید (Okoye et al., 2015):

$$I_t = c \times p_t \times A \times 0.001 \quad (1)$$

که در آن I_t برابر با حجم آب استحصال شده برحسب m^3 ، c ضریب رواناب که در اینجا برابر با $0/8$ در نظر گرفته شده است، p_t ارتفاع بارندگی برحسب mm و A مساحت حوضه آبریز (بام) برحسب m^2 است.

حجم مخزن ذخیره‌سازی را می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر روش منحنی جرم و پیک‌های متوالی برآورد کرد؛ اما در حال حاضر بهینه‌سازی یک روش اساسی مدیریتی محسوب می‌شود؛ زیرا، از یک سو منابع و امکانات موجود، ثابت بوده و حتی در مواردی رو به کاهش می‌باشد و از سوی دیگر نیازها و درخواست‌ها رو به افزایش است (Meftah Halaghi et al., 2011).

در این پژوهش، از داده‌های بارندگی روزانه‌ی یک دوره ۲۰ ساله (از سال ۱۳۷۵ تا سال ۱۳۹۵) استفاده شده است و مدل‌سازی برای نیمسال اول سه سال ۱۳۹۵، ۱۳۸۸ و ۱۳۷۸ به‌عنوان شاخص‌های ترسالی، خشک‌سالی و سال نرمال انجام گرفته است. سال‌های شاخص از روش شاخص بارندگی تعیین شده‌اند، که شاخص بارندگی با نسبت بارش هر سال به بارش متوسط سالانه دوره‌ی آماری برابر است. در این روش تا ۲۰٪ کمتر و بیشتر از ۱، به‌عنوان سال نرمال در نظر گرفته می‌شود (Rahimi et al., 2010). میزان تقاضا برابر با آب مصرفی برای آبیاری فضای سبز هر یک از ساختمان‌ها و گیاه کشت شده در فضای سبز، چمن فرض شده است. برای تعیین میزان تقاضای روزانه، نیاز آبی روزانه‌ی چمن که در جدول شماره ۱ آورده شده است، در مساحت فضای سبز ساختمان ضرب شده است. هم‌چنین با توجه به وضعیت بارش و نیاز آبی گیاه چمن در شهر رشت، فضای سبز تنها در فصول گرم سال نیاز به آبیاری دارد و در فصول پر باران (پاییز و زمستان)، بارندگی به‌طور مستقیم نیاز آبی گیاه را تأمین کرده و نیاز به

Table 1- The water needs of the grass reference plant in millimeters per day, in different climates and temperatures (Ansari et al., 2009)

جدول ۱- نیاز آبی گیاه مرجع چمن بر حسب میلی‌متر در روز، در اقلیم و درجه حرارت‌های متفاوت (Ansari et al., 2009)

Climatic Index	Daily average temperature		
	Low $\leq 15^\circ C$	Medium Between $15^\circ C$ and $25^\circ C$	High $\geq 25^\circ C$
Desert climate/ Dry	4-5	7-8	9-10
Semi-arid	4-5	5-7	8-9
Wet	3-4	4-5	7-8
Semi-Wet	1-2	3-4	9-10

اگر بتوان در مدل‌سازی، توابع هدف و قیود را به صورت خطی معرفی نمود، برنامه‌ریزی خطی یک راه حل بسیار کارآمد خواهد بود. مضاف بر این که جواب‌های به‌دست آمده از برنامه‌ریزی خطی همیشه بهینه مطلق می‌باشد (Meftah Halaghi et al., 2011). در این تحقیق برای بهینه‌سازی از نرم‌افزار LINGO.17 استفاده شده و دو مدل بهینه‌سازی متفاوت برای هر یک از بام‌ها با میزان تقاضای مربوط به آن بام به کار گرفته شده است.

۲-۱-۲-۲- مدل برنامه‌ریزی خطی بدون قابلیت اعتماد

این مدل، مدل ذخیره-آبدهی با بهینه‌سازی است و از روش برنامه‌ریزی خطی (LP) قابل حل است. در این مدل، بهینه‌سازی بر اساس بیشینه بارش، انجام شده است. به طوری که، مخزن توانایی ذخیره تمامی بارش را داشته باشد، بنابراین حجم مخزن برآورد شده بسیار بزرگ خواهد بود. از طرفی با توجه به هزینه‌های نصب و نگهداری، طراحی مخزن بزرگ مقرون به صرفه نمی‌باشد. از این رو در این مدل برای هر یک از بام‌ها با توجه به نیاز آبی فضای سبز، بیشینه حجم مخزن تعریف شده و مدل مجاز به برآورد مخزنی بزرگ‌تر از این حجم نمی‌باشد و آب مازاد باید از مخزن سرریز گردد. روابط استفاده شده در مدل در ادامه آورده شده است:

$$\min = T_{cap} \quad (2)$$

$$S_t = I_t - R_t + S_{t-1} - Spill_t \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (3)$$

$$\forall 1 \leq t \leq T \quad S_t \geq S_{min} \quad (4)$$

$$T_{cap} \leq S_{max} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (5)$$

$$S_t \leq T_{cap} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (6)$$

$$S_t, I_t, R_t, T_{cap}, Spill_t \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad (7)$$

در روابط فوق، T برابر با تمام روزهای دوره یعنی ۱۸۶ روز است. T_{cap} در این مدل تابع هدف است که برابر با حجم بهینه مخزن ذخیره‌سازی است. S_{min} کمینه حجم مخزن و S_{max} بیشینه حجمی که می‌توان مخزن را ساخت و قبل از شروع محاسبات با توجه به هزینه‌ها، فضای موجود و هدف از طراحی برای هر یک از بام‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر مکعبی به ترتیب برابر با ۵، ۸ و ۱۰ متر مکعب در نظر گرفته شده است. همین‌طور در صورت وجود سرریز $S_{max} = T_{cap}$ است. S_t ، I_t و R_t به ترتیب حجم ذخیره مخزن، حجم جریان ورودی و حجم جریان خروجی کنترل شده از مخزن صرفاً جهت برداشت ثابت D می‌باشد، در حالی که $Spill_t$ جریان خروجی از مخزن مازاد بر برداشت مطمئن D است.

معادله ۲ تابع هدف است و هدف از بهینه‌سازی کمینه نمودن حجم مخزن ذخیره‌سازی می‌باشد و T_{cap} برابر با حجم بهینه مخزن

جمع‌آوری است. معادله ۳، معادله بیلان حجمی آب است. در رابطه ۴، به دلیل این که، مخزن در ابتدای دوره مورد مطالعه خالی فرض شده است، مقدار S_{min} برابر با صفر است و این معادله برای اطمینان از منفی نشدن حجم آب در مخزن اعمال شده است. رابطه ۵، برای اطمینان از محاسبه حجم بهینه‌ی صحیح به طوری که کوچکتر یا مساوی حجم پیشنهادی باشد، اعمال شده است. رابطه ۶ نیز بیانگر آن است که حجم آب ذخیره شده داخل مخزن نباید از حجم مخزن بزرگتر باشد و رابطه ۷ برای برقراری شرط مثبت بودن تمام متغیرها در برنامه‌ریزی عددی اعمال شده است. به منظور تعیین سرریز آب از مخزن از رابطه ۸ استفاده شده است:

$$Spill_t = \begin{cases} I_t + S_{t-1} - R_t - S_{max} & , I_t + S_{t-1} - R_t > T_{cap} \\ 0 & , I_t + S_{t-1} - R_t \leq T_{cap} \end{cases} \quad (8)$$

برای مدیریت آب خروجی از مخزن نیز محدودیت ۹ اعمال شده است:

$$R_t = \begin{cases} 0 & , p_e \geq k_t \\ D_t - (p_e \times A) & , S_t + I_t \geq D_t - (p_e \times A) \\ S_t + I_t & , S_t + I_t < D_t - (p_e \times A) \end{cases} \quad (9)$$

رابطه ۹ برای مدیریت خروجی از مخزن بیان شده است و بر این موضوع تأکید دارد که در محاسبات، آبی بیشتر از آب موجود در مخزن به عنوان مقدار تقاضا و خروجی از مخزن لحاظ نگردد. همچنین در روزهایی که بارندگی رخ داده است و مقدار بارش نیاز آبی گیاه را تأمین می‌کند، احتیاجی به آبیاری مکمل نیست بنابراین در روزهای بارانی در مدل، بارندگی مؤثر تعریف شده تا در صورت کافی بودن بارش جهت آبیاری چمن خروجی از مخزن صفر باشد که شرط اول این رابطه، بیانگر این موضوع است. در این رابطه p_e نشان‌دهنده بارش مؤثر K_t و میزان نیاز آبی گیاه چمن است که با توجه به جدول ۱ تعیین گردیده است همین‌طور D_t ، بیانگر میزان حجم مورد تقاضای فضای سبز و A مساحت فضای سبز که برای هر ساختمان متغیر است. در شرط دوم معادله ۹ در صورتی که بارش رخ داده اما مقدارش بسیار کمتر از نیاز آبی گیاه چمن است، توسط رابطه $(p_e * A)$ مقدار حجم آب بدست آمده جهت آبیاری که به صورت مستقیم از بارش تأمین گشته محاسبه و از کل حجم نیاز آبی فضای سبز کم شده است و بدنبال آن کمبود آب توسط آبیاری با مخزن تأمین می‌گردد.

برای بررسی نحوه عملکرد مدل‌ها، از مقایسه چند معیار توسعه یافته برای بیان کارایی سیستم مخازن استفاده می‌شود (Farhangi and Bozorg hadad, 2010). پس از برآورد حجم مخزن، ضرایب اعتماد‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری برای هر یک از احجام بدست آمده، به طور مستقل به ترتیب از روابط ۱۰ تا ۱۲ محاسبه شده است (Loucks and Van Beek, 2005):

$$R_t \geq D_t - Z_t \quad (13)$$

$$\frac{\sum Z_t}{T} \geq \alpha \quad (14)$$

در روابط بالا Z_t متغیر باینری با مقادیر صفر یا یک است. که در روزهایی که مقدار کل نیاز آبی تأمین نمی‌شود، این مقدار برابر با صفر و در روزهایی که مخزن قادر به تأمین نیاز است، برای این پارامتر مقدار یک لحاظ می‌گردد.

با بررسی ساختمان‌های مرسوم در شهر رشت که در اغلب موارد بام ساختمان‌ها به طور سطح شیب‌دار دو طرفه ساخته شده است، چهار بام مجزا با مساحت‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر مربع جهت مدل‌سازی و انجام محاسبات در نظر گرفته شده است و همچنین میزان تقاضا برای هریک از این بام‌ها که در مدل لحاظ شده در شکل ۳ نشان داده شده است. در این تحقیق، میزان تقاضا (D_t)، از حاصل ضرب نیاز آبی روزانه چمن (K_t) و مساحت فضای سبز بدست می‌آید. با در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی شهر رشت و متوسط دمای هر ماه از دوره مورد مطالعه و با توجه به جدول ۱، نیاز آبی گیاه چمن برابر با ۳، ۴ و ۵ میلی‌متر در روز برای ماه‌های مختلف در نظر گرفته شده است. برای هر یک از ۴ ساختمان مورد مطالعه، مساحت فضای سبز نیز برابر با ۲۵٪ مساحت بام متناظر منظور شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل برنامه‌ریزی خطی بدون قابلیت اعتماد

در این مدل برای هر یک از سال‌های شاخص، چهار نمودار حجم آب ذخیره شده در مخزن، حجم آب باران جمع‌آوری شده توسط بام، حجم آب خروجی از مخزن برای تأمین تقاضا و میزان سرریز برای مساحت بام‌های مختلف، توسط نرم‌افزار LINGO.17 بهینه‌سازی و در محیط Excel رسم شده است.

$$\alpha = \frac{\text{موفقیت دفعات تعداد}}{\text{دوره کل}} = \frac{S}{S+F} \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{\text{تعداد حالتی که سیستم از شکست وارد حالت موفقیت شده}}{\text{طول بازه‌های شکست}} = \frac{m}{F} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m \lambda_t \quad (12)$$

در روابط بالا a ، ضریب اعتمادپذیری، g ، ضریب برگشت‌پذیری و l ضریب آسیب‌پذیری است. همچنین پارامترهای S برابر با تعداد دفعات موفقیت و F برابر با تعداد دفعات شکست، m تعداد بازه‌های شکست و l_t برابر با مقدار کمبود است.

قابل ذکر است که اعتمادپذیری نشان‌دهنده احتمال تأمین نیاز است، برگشت‌پذیری سرعت بازگشت یک سیستم از حالت شکست به حالت عادی را نشان می‌دهد و آسیب‌پذیری نشان‌دهنده اختلاف بین مقدار آستانه و مقادیر غیررضایت‌بخش سری زمانی است (Hagbin and Almohammadi, 2018).

۲-۲-۲- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی با منظور کردن قابلیت اعتماد

این مدل، با روش برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) بهینه‌سازی شده است. روابط حاکم بر این مدل، همانند روابط مدل برنامه‌ریزی خطی بدون قابلیت اعتماد است، با این تفاوت که در این مدل ضریب اطمینان در ابتدا ذکر شده و مدل با توجه به ضریب اطمینان و میزان تقاضای مشخص، حل شده و حجم بهینه مخزن را برآورد می‌کند همچنین در این مدل مقدار S_{max} برای تمامی بام‌ها برابر با ۲۰ مترمکعب تعیین شده است. برای اعمال این شرایط مربوط به قابلیت اطمینان به روابط استفاده شده در مدل برنامه‌ریزی خطی بدون قابلیت اعتماد (رابطه‌های ۲ تا ۹) رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ اضافه شده است:

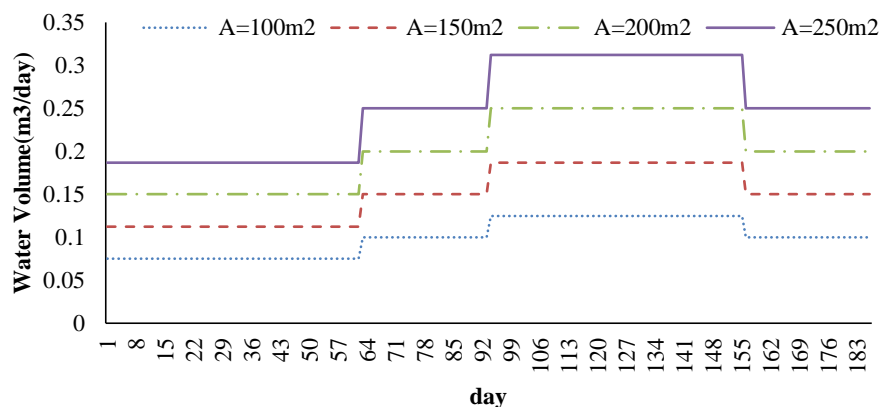


Fig. 3- The volume of Demand in roofs with different areas
 شکل ۳- میزان تقاضای روزانه مربوط به فضای سبز ساختمان‌هایی با مساحت مختلف

به‌عنوان نمونه، نمودارهای مربوط به دو ساختمان با مساحت‌های بام ۱۰۰ و ۲۵۰ مترمربع آورده شده است. مدل بهینه‌سازی بر مبنای بارش باریده شده انجام گرفته است، به طوری که تمام آب حاصل از بارندگی بر روی بام جمع‌آوری گردد، اما حجم بدست آمده برای هریک از مخازن با این هدف و در این مدل‌سازی بسیار بزرگ برآورد شده است. به طوری که، ممکن است برای استفاده در منازل مسکونی اقتصادی نباشد. بنابراین، با توجه به میزان تقاضای روزانه، که در این تحقیق به ازای هر یک از مساحت بام‌ها، مقداری مشخص است و هزینه‌های ساخت، نصب و نگهداری مخزن، برای هر یک از مساحت بام‌ها با در نظر گرفتن میزان فضای اشغالی توسط مخزن، در محاسبات، حجمی به‌عنوان بیشینه‌ی حجم مخزن تعیین شده و آب مازاد به صورت سرریز از مخزن خارج شده و سپس عملکرد مخازن مورد بررسی قرار گرفته است. بیشینه حجم مخزنی که مدل مجاز است برای هر یک از بام‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ متر مربعی برآورد نماید، به‌ترتیب برابر با ۵، ۶، ۸ و ۱۰ متر مکعب در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ میزان آب جمع‌آوری شده توسط بام‌هایی به مساحت ۱۰۰ و ۲۵۰ مترمربع در سه سال شاخص نشان داده شده است.

همانطور که انتظار می‌رود، شکل ۴ نشان می‌دهد حجم آب جمع‌آوری شده در سال شاخص ترسالی بیشتر از دو سال دیگر است.

در شکل ۵ حجم آب باران ذخیره شده‌ی روزانه در دو مخزن به حجم‌های ۵ و ۱۰ متر مکعب برای دو بام با مساحت‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ مترمربع در سه سال شاخص نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵، می‌توان نتیجه گرفت در سال شاخص ترسالی در تمامی طول دوره، آب ذخیره شده در مخازن کافی بوده و در طول دوره مخازن خالی نشده‌اند. در سال شاخص نرمال در اوایل دوره مخازن چند روزی خالی بوده و با شروع بارندگی ذخیره‌سازی شروع شده و مخازن پر شده‌اند، اما با توجه به این که آب ذخیره شده در مخزن کوچک‌تر، کم‌تر است، به دلیل نیاز آبی کمتر، در طول دوره مخزن خالی نشده است در حالی که آب ذخیره شده در مخزن بزرگ‌تر در اواسط دوره خالی شده و چند روزی ذخیره مخزن صفر بوده است. در سال خشک‌سالی نیز آب ذخیره شده در هر دو مخزن کافی نبوده و هم در اوایل دوره و هم اواسط دوره مخزن چند روزی خالی بوده است. در شکل ۶ حجم آب تأمین شده روزانه توسط مخازن ذخیره‌سازی آب باران با توجه به میزان تقاضای روزانه برای آبیاری فضای سبز در سه سال شاخص برای دو ساختمان به مساحت بام‌های ۱۰۰ و ۲۵۰ مترمربع نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۶ می‌توان بیان کرد هر چه میزان بارش و به‌دنبال آن آب ذخیره شده در مخازن بیشتر باشد، مخازن انتخابی، کارایی بیشتری داشته و با آب ذخیره شده در مخازن می‌توان تعداد روزهای بیشتری آبیاری را انجام داد. همچنین هر چه مساحت فضای سبز کوچک‌تر باشد، با اینکه مساحت بام نیز کوچک‌تر است، اما در دوره مورد مطالعه تعداد روزهای بیشتری مخزن دارای آب کافی است. در شکل ۶ منقطع شدن نمودار در برخی از روزها نشان‌دهنده بارش و کافی بودن مقدار بارش مؤثر جهت آبیاری چمن در آن روز، و بدنبال آن بی‌نیاز بودن فضای سبز به آبیاری توسط مخزن ذخیره‌سازی آب باران است. در شکل ۷ میزان کمبود دو مخزن در طول دوره برای سال‌های شاخص نشان داده شده است. از آنجا که در سال شاخص ترسالی با توجه به نمودارهای پیشین، آب ذخیره شده در مخازن به صفر نرسیده است و میزان تقاضای تأمین شده نیز برابر با همان نیاز آبی روزانه در طول دوره بوده است، بنابراین در این سال برای هیچ‌یک از مخازن، کمبودی مشاهده نشده است. در شکل ۷، نمودار کمبود مربوط به شاخص‌های سال نرمال و خشک‌سالی آورده شده است.

با توجه به شکل ۷ مخازن در سال شاخص خشک‌سالی، کمبود بیشتری نسبت به سال شاخص نرمال دارند. همچنین با توجه به نمودارها، با افزایش نیاز آبی میزان کمبودها نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۸، میزان سرریز از مخازن جمع‌آوری آب باران در سه سال مورد بررسی نشان داده شده است.

از نمودارهای شکل ۸ می‌توان نتیجه گرفت، در سال شاخص ترسالی با افزایش بارندگی، آب جمع‌آوری شده از بام افزایش یافته است و از طرفی با ثابت بودن حجم مخزن ذخیره‌سازی، آب مازاد به صورت سرریز از مخزن خارج شده است. بنابراین در شاخص ترسالی مخازن میزان سرریز بیشتری نسبت به دو سال شاخص دیگر دارند. همچنین با افزایش سطح جمع‌آوری‌کننده باران، در حالی که تقاضا نیز به همان میزان افزایش داشته است، افزایش سرریز از مخازن رخ داده است.

در ادامه، میزان کارایی و ضرایب اعتمادپذیری مخازن با توجه به حجم مخزن ذخیره‌سازی، حجم آب ذخیره شده و میزان تقاضای روزانه محاسبه شده و در جدول ۲ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج جدول ۲، حجم‌های انتخابی برای ذخیره‌سازی آب باران در سال‌های شاخص، کارایی خوبی دارد و اعتمادپذیری این مخازن نسبتاً بالا و بین ۸۲٪ تا ۱۰۰٪ است. آب ذخیره شده در مخازن در شاخص ترسالی برای تأمین نیاز آبی گیاه کشت شده در فضای سبز ساختمان‌ها کاملاً کافی است و مقدار آب ذخیره شده در این مخازن با

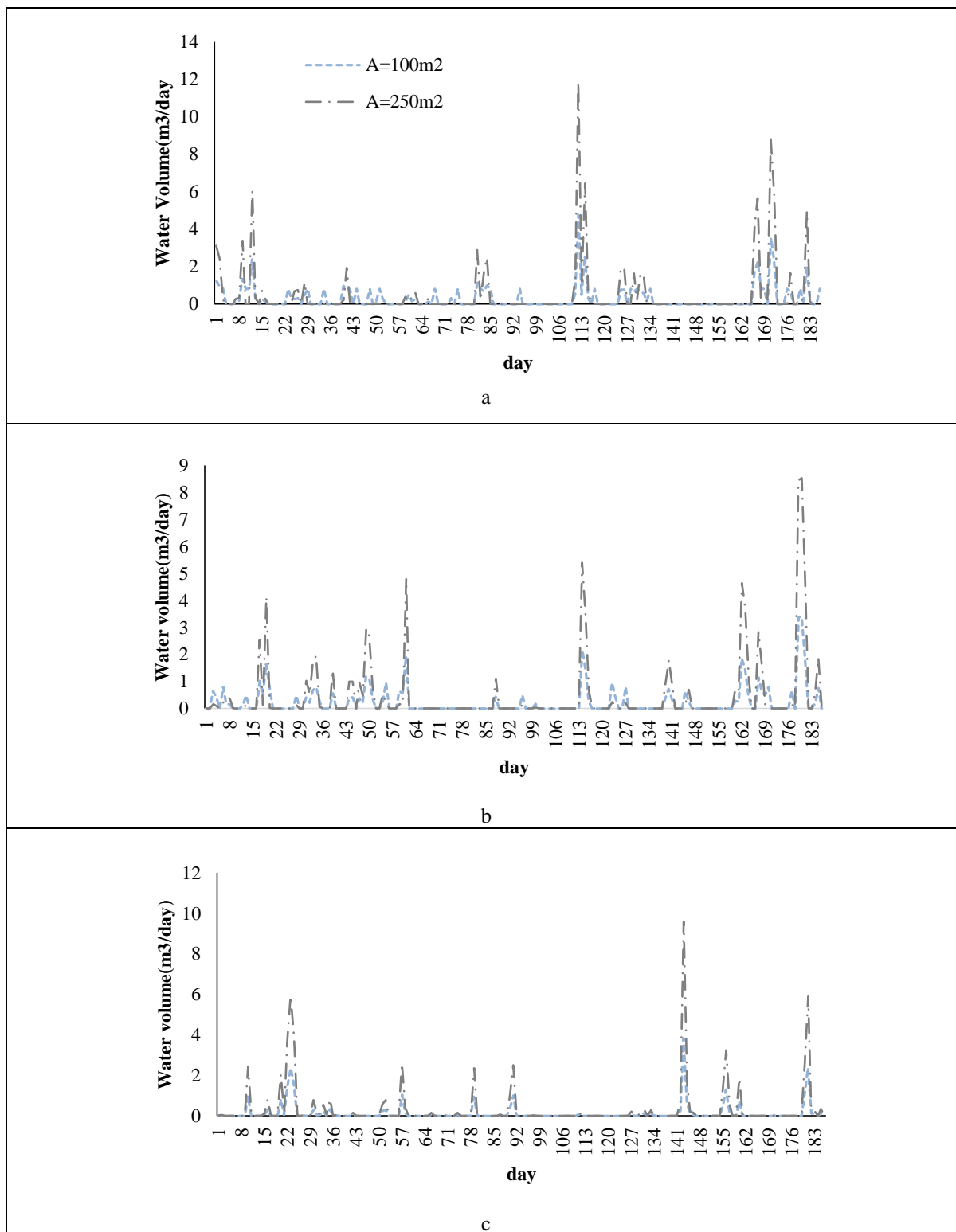


Fig. 4- The volume of rainwater collected in roofs with different areas in the index Years (a: Wet, b: Normal and c: Dry)

شکل ۴- حجم آب باران جمع آوری شده روزانه از بام‌هایی با مساحت‌های مختلف در سال‌های شاخص (a: ترسالی، b: سال نرمال و c: خشک‌سالی)

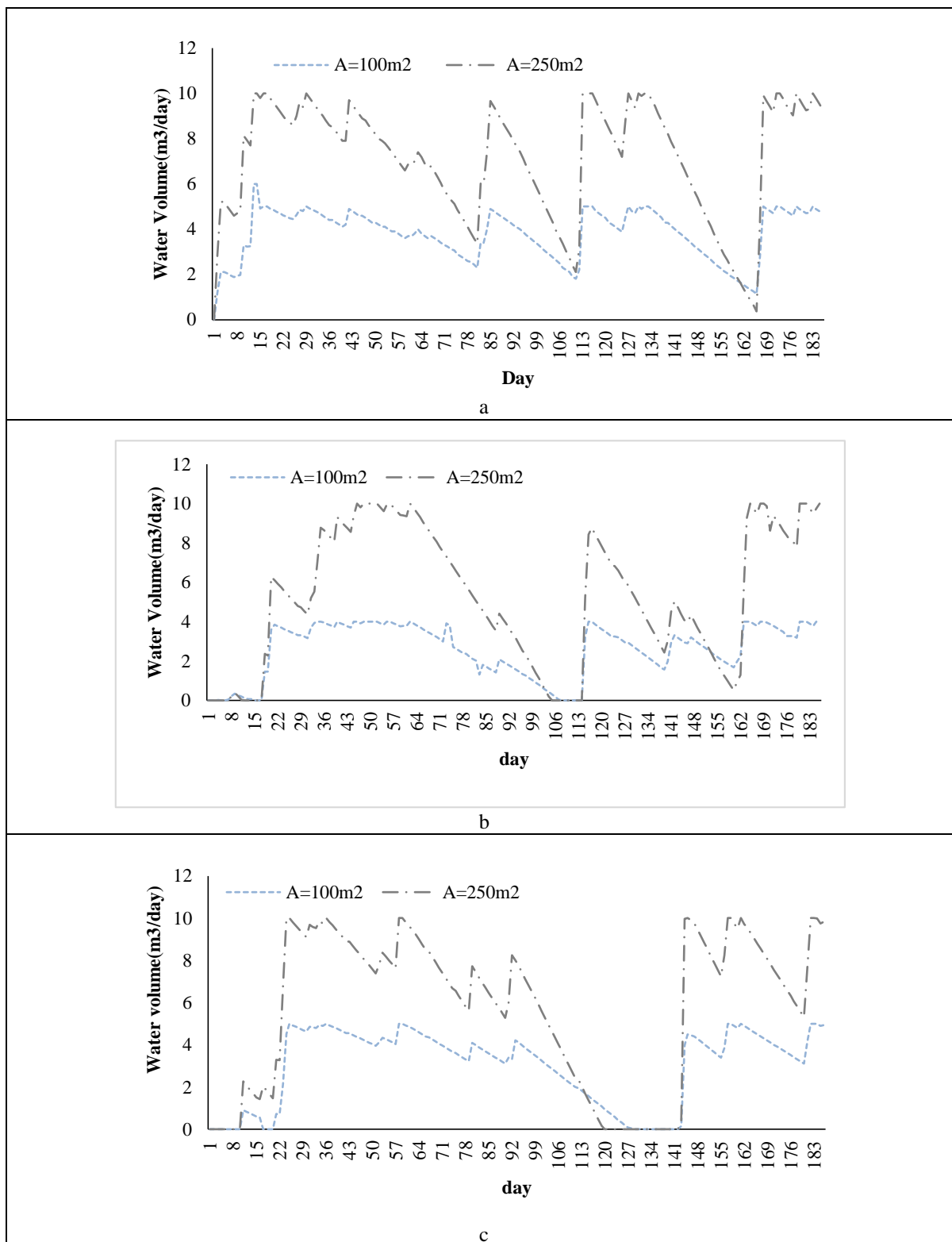


Fig. 5- The volume of rainwater stored in the tank for roofs with different area in the index Years (a: Wet, b: Normal and c: Dry)

شکل ۵- حجم آب باران ذخیره شده در مخزن برای بام‌هایی با مساحت مختلف در سال‌های شاخص (a: ترسالی، b: سال نرمال و c: خشک‌سالی)

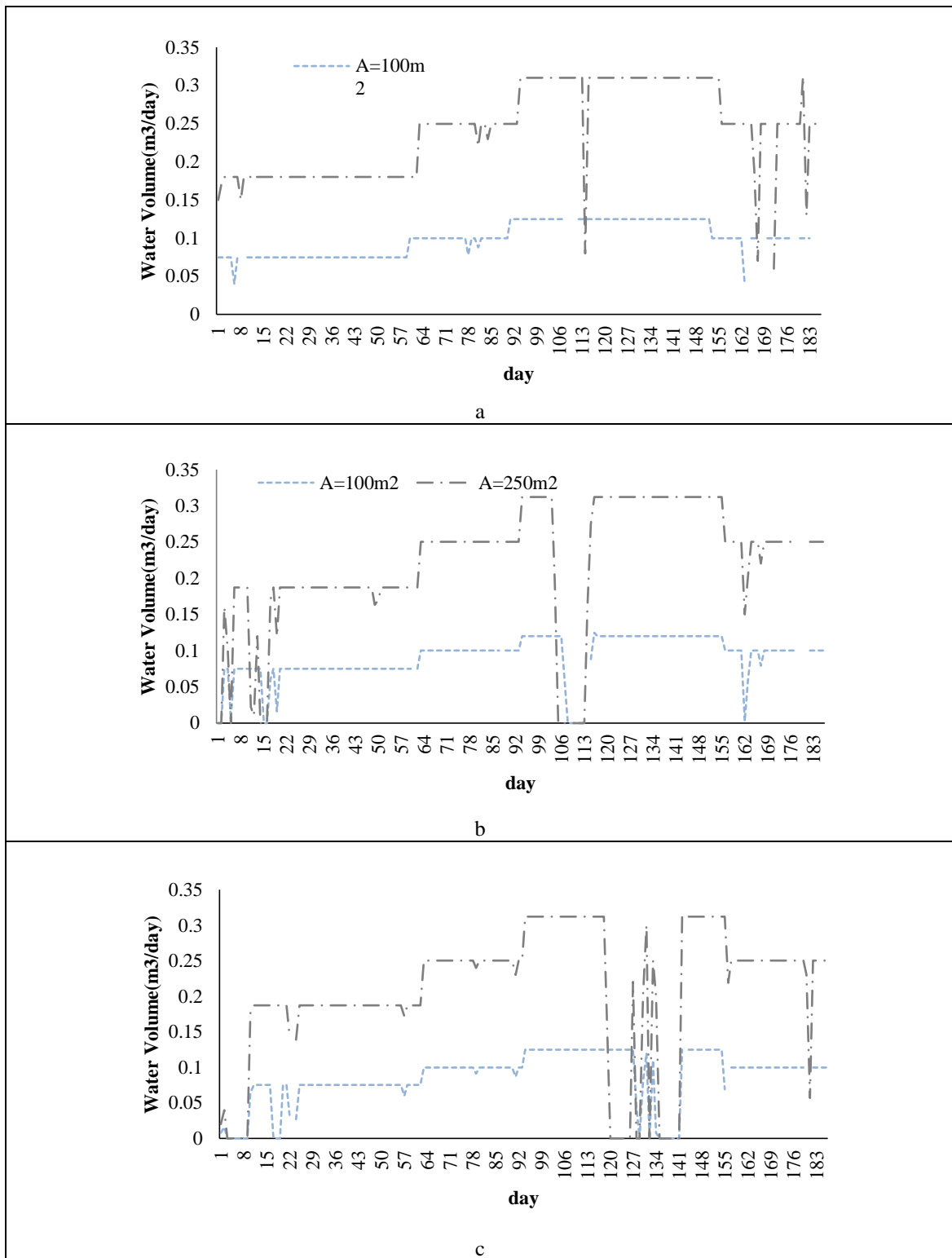


Fig. 6- The volume of water supplied from the tank for the demand for roofs with different area in the index Years (a: Wet, b: Normal and c: Dry)

شکل ۶- میزان تقاضای تأمین شده از مخزن برای مساحت‌های بام‌های مختلف در سه سال شاخص (a: ترسالی، b: سال نرمال و c: خشک‌سالی)

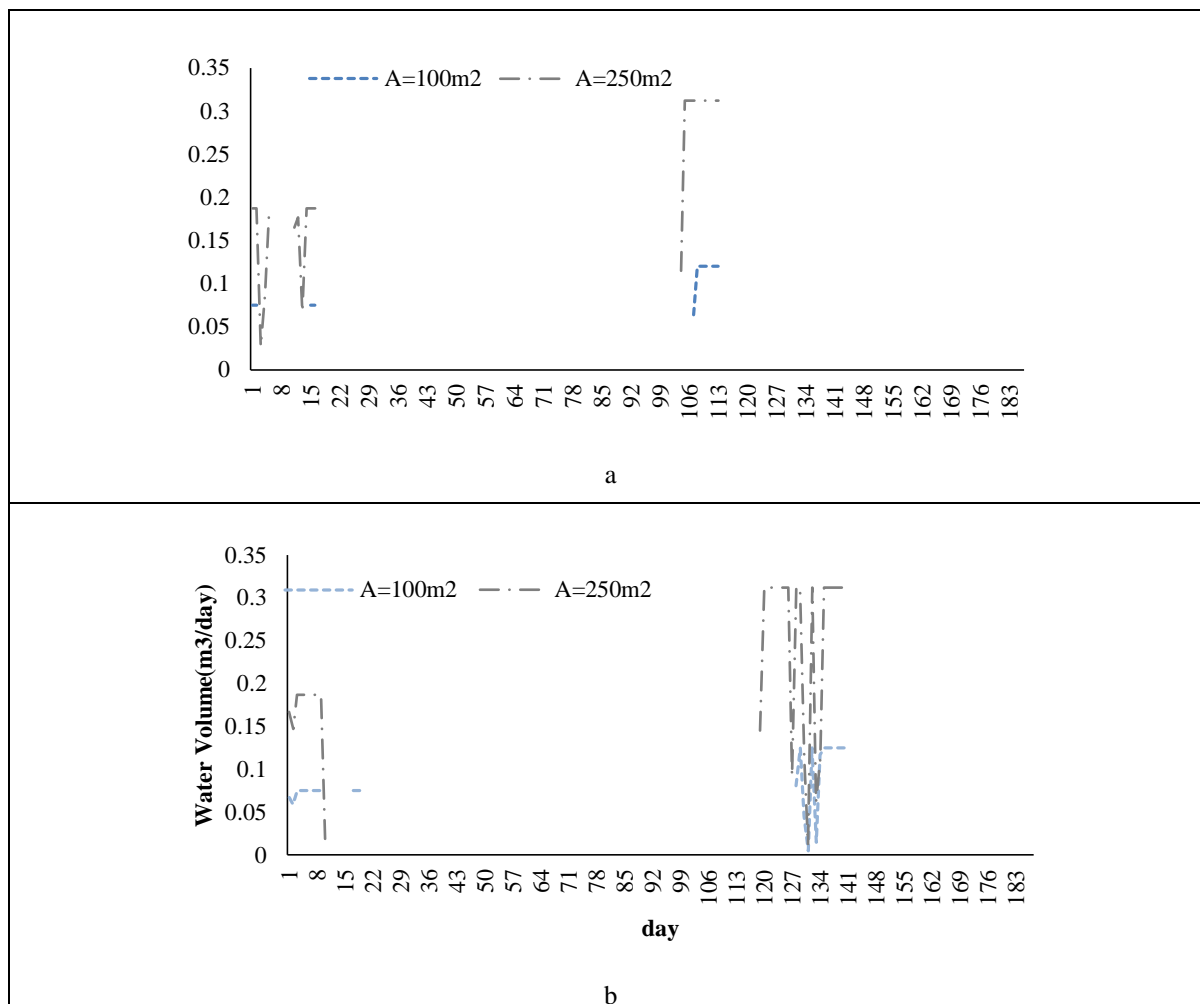


Fig. 7- Deficit scores in two index years (A: normal year index and b: dry index)
شکل ۷- میزان کمبود در دو سال شاخص (a: شاخص سال نرمال و b: شاخص خشک‌سالی)

سال‌های شاخص در سه سطح اعتمادپذیری (۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪) با توجه به بارش و میزان تقاضای روزانه و آب موجود در مخزن در ابتدای دوره، حجم مخزن بهینه برآورد شده است. در جدول ۳، نتایج حاصل از این مدل‌سازی نشان داده شده است.

نتایج حاصل نشان داده است در هر سه سال شاخص، هرچه انتظار اعتمادپذیری از مخزن بالاتر باشد و تعداد روزهای بیشتری از مخزن استفاده شود و نیاز به منبع آبی دیگر به حداقل برسد، حجم مخزن ذخیره‌سازی باید بزرگتر باشد. همچنین، هر چه میزان بارندگی کمتر بوده، حجم مخزن ذخیره‌سازی بزرگتر برآورد شده است، به عبارت دیگر، مخزن باید قادر باشد تمامی بارش باریده شده را ذخیره نماید و در صورت عدم وقوع بارش در طول دوره، تعداد روزهای بیشتری قادر به تأمین تقاضا باشد. در تمامی مدل‌های بررسی شده، نتایج نشان دادند که با افزایش مساحت باران‌گیر و تقاضای روزانه، حجم مخزن نیز افزایش یافته است.

کاهش بارندگی در سال نرمال و خشک‌سالی کم شده و در طول دوره مورد بررسی، تمامی نیاز آبی گیاه را تأمین نکرده است. همچنین بزرگ‌تر بودن ضریب برگشت‌پذیری و کوچک‌تر بودن ضریب آسیب‌پذیری در مخازن کوچک‌تر، نشان دهنده بالاتر بودن کارایی این مخازن نسبت به مخازن بزرگتر است.

۳-۲- مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی با قابلیت اعتمادپذیری

فرمول‌نویسی این مدل نیز همانند مدل برنامه‌ریزی خطی بدون قابلیت اعتمادپذیری انجام گرفته با این تفاوت که در فرمول‌های این مدل، شرط اعتمادپذیری نیز آورده شده است. همچنین، بزرگ‌ترین حجم مخزن در فرمول برابر با متوسط بیشترین آب بارانی که می‌توان در طول دوره از چهار بام انتخابی، استحصال نمود، یعنی ۲۰ مترمکعب در نظر گرفته شده است. برای هر یک از مساحت بام‌ها در هر یک از

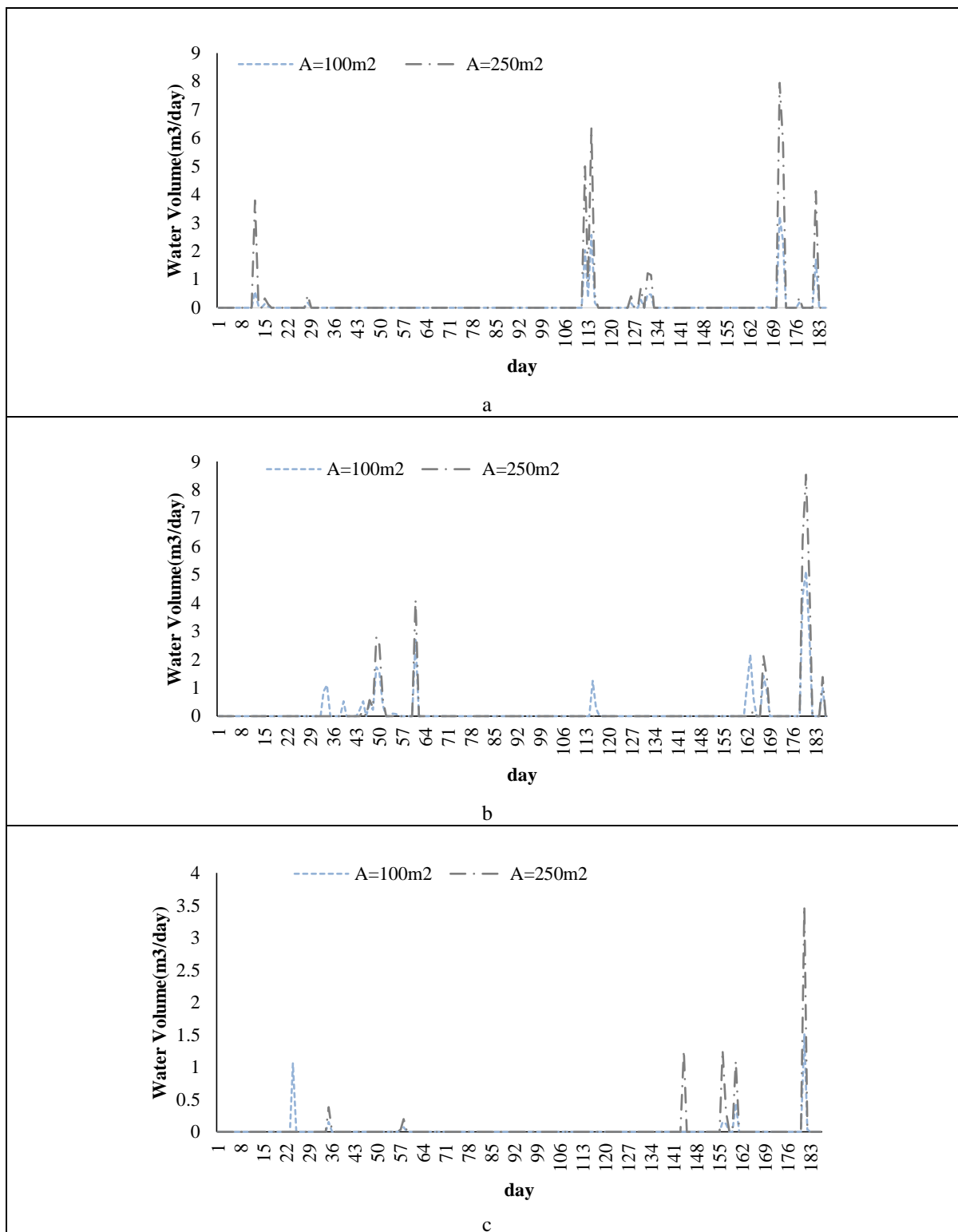


Fig. 8- The volume of water overflow from the Tanks for roofs with different area in the index Years (a: Wet, b: Normal and c: Dry)

شکل ۸- حجم آب سرریز شده از مخازن برای مساحت‌های مختلف پشت‌بام‌ها در سه سال شاخص (a: ترسالی، b: سال نرمال و c: خشک‌سالی)

Table 2- Different tank performance

جدول ۲- نحوه عملکرد مخازن مختلف

Year index	Roof area (M ²)	The volume of (M ³) the tanks	Reliability coefficient	Resilience coefficient	Vulnerability factor
Wet index	100	5	1	-	-
	150	6	1	-	-
	200	8	1	-	-
	250	10	1	-	-
Normal year index	100	5	0.93	0.25	0.057
	150	6	0.88	0.18	0.716
	200	8	0.88	0.18	1.21
	250	10	0.88	0.18	1.52
Dry index	100	5	0.85	0.148	1.16
	150	6	0.83	0.064	1.5
	200	8	0.82	0.064	1.5
	250	10	0.82	0.06	1.86

Table 3- The volume of the rainwater storage tank based on a different confidence coefficients

جدول ۳- حجم مخزن ذخیره سازی آب باران بر اساس ضرایب اعتمادپذیری مختلف

Year	Roof area (M ²)	The volume of the tanks (M ³)		
		Reliability 70%	Reliability 80%	Reliability 90%
Year 1395 Wet index	100	1.18	1.86	2.55
	150	1.76	2.77	3.82
	200	2.36	3.71	5.12
	250	2.95	4.63	6.51
Year 1378 Normal year index	100	1.18	1.88	3.32
	150	2.7	4.11	6.46
	200	3.56	5.48	8.6
	250	4.45	6.84	10.8
Year 1388 Dry index	100	1.78	3.8	5.77
	150	2.51	4.88	8
	200	3.36	6.62	10.79
	250	4.2	8.28	13.49

خطی نیست. همچنین با افزایش بارندگی حجم مخزن در دوره ۲۰ ساله مورد مطالعه کاهش یافته است.

بررسی نتایج حاصل از تحلیل که در جدول ۴ آورده شده، نشان داده است که برای کلیه تقاضاها، با اعتمادپذیری بالا، با توجه به میزان بارش در هر سال، مدل قادر به برآورد حجم مخزن نبوده است. به عنوان مثال در سالی با بارندگی نرمال، نمی توان برای تأمین نیاز آبی ۰/۱۶ مترمکعب در روز مخزنی با ضریب اعتمادپذیری بالای ۸۰٪ طراحی نمود. در این سال با توجه به میزان بارندگی، بزرگترین حجم مخزنی که برای این تقاضا برآورد شده برابر با ۱۱/۳۵ مترمکعب است که دارای قابلیت اطمینان ۷۴٪ می باشد. یکی از دلایل این مسئله می تواند پراکندگی زمانی بارش باشد. یعنی در روزهای آخر دوره، با بارش های پی در پی و چند روزه حجم قابل توجهی آب به عنوان ورودی به مخزن در نظر گرفته می شود و مدل حجم مخزن برآوردی را متناسب با بزرگترین حجم ورودی که در آخر دوره اتفاق افتاده برآورد می کند.

۳-۳- بررسی تأثیر میزان تقاضای روزانه بر حجم مخزن

به منظور بررسی میزان تأثیر تقاضا بر حجم مخزن، در ساختمانی با مساحت بام ۱۰۰ مترمربع، پنج حجم مخزن برای پنج مقدار نیاز متفاوت که در طول دوره ۱۸۶ روزه مقداری ثابت است، برآورد گردید. نیاز آبی برای وقتی که فضای سبز ساختمان برابر با ۱۰٪، ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ مساحت بام باشد، برای آبیاری چمن کشت شده در فضای سبز برابر با ۰/۰۸، ۰/۰۴، ۰/۱، ۰/۱۲ و ۰/۱۶ متر مکعب در روز برای تمام دوره در نظر گرفته شده است. در این سناریو، بهینه سازی حجم مخزن از روش مدل ذخیره-آبدهی-اعتمادپذیری انجام گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل این مدل در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج حاصل نشان داده است که، در تمامی موارد در اعتمادپذیری بزرگتر، مخزن افزایش حجم دارد و هر چه میزان تقاضا بیشتر شود، حجم مخزن نیز بزرگتر می شود، اما رابطه این دو پارامتر با یکدیگر

Table 4- Tank volume for different demand from storage-drainage-reliability method with optimization method (m³)

جدول ۴- حجم مخازن به ازاء تقاضای مختلف حاصل از روش ذخیره-آبدهی-اعتمادپذیری با روش بهینه‌سازی (مترمکعب)

	The volume of the tanks (M3)									
	Reliability 90%					Reliability 80%				
	Demand0 0.04 (m3/day)	Demand0 0.08 (m3/day)	Demand 0.1 (m3/day)	Demand 0.12 (m3/day)	Demand 0.16 (m3/day)	Demand 0.04 (m3/day)	Demand 0.08 (m3/day)	Demand 0.1 (m3/day)	Demand 0.12 (m3/day)	Demand 0.16 (m3/day)
Wet index	0.82	1.92	2.7	3.74	-	0.55	1.44	2	2.67	4.95
Normal year index	1.1	3.18	4.2	5.26	-	0.49	1.8	2.41	3.17	-
Dry index	1.2	3.1	5.1	-	-	0.64	1.55	3.35	5.2	-

در نهایت حجم مخزن بهینه، برای بامی به مساحت ۱۰۰ مترمربع جهت آبیاری فضای سبز با میزان تقاضای متفاوت در دو سطح اعتمادپذیری ۸۰٪ و ۹۰٪ برآورد گردید. نتایج نشان دادند که در بالاترین سطح اعتمادپذیری، با زیاد شدن میزان تقاضای روزانه آب جمع‌آوری و ذخیره‌شده از بامی به مساحت ۱۰۰ مترمربع کافی نیست.

در حالی که در اواسط دوره ممکن است یک ماه کامل بارندگی اتفاق نیفتد و یا در طول دوره میزان بارندگی بسیار کم باشد. بنابراین مخزن پر نبوده و یا بعد از پر شدن، خالی شده و چند روزی قادر به تأمین نیاز نبوده است، این موضوع اعتمادپذیری مخزن را کاهش می‌دهد. بنابراین، بزرگ بودن حجم مخزن نمی‌تواند دلیلی بر آبدهی مخزن در تمام طول دوره باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Rain Water Harvesting
- 2- Guilan Meteorological Organization

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق در ابتدا به بررسی عملکرد چهار مخزن ذخیره‌سازی آب باران با احجام مختلف متناسب با آب باران جمع‌آوری شده از چهار بام با مساحت‌های مختلف در سه سال شاخص ترسالی، سال نرمال و خشک‌سالی پرداخته شد. حجم این مخازن عبارت از ۵، ۶، ۸ و ۱۰ متر مکعب برای جمع‌آوری باران از بام‌های به مساحت ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مترمکعب است. برای بررسی عملکرد این مخازن از ضرایب اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده شده است و در نهایت نتیجه‌گیری شده که عملکرد مخازنی با این احجام قابل قبول است و ضریب اعتمادپذیری بالای ۸۰٪ را دارا می‌باشند.

۵- مراجع

- Adham A, Wesseling J G, Riksen M, Ouassar M, Ritsema c J (2016) A water harvesting model for optimizing rainwater harvesting in the wadi Oum Zessar watershed, Tunisia. *Agricultural Water Management* 176:191-202
- Ansari H, Sharifan H, Davary K (2009) *Irrigation principles and practices*. Jahad Daneshgahi Mashhad, 316p
- Campisano A, Modica C (2012) Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources Conservation and Recycling* 63:9-16
- Farhangi M, Bozorg hadad O (2010) Evaluation of performance indices of reservoir system management models in drought events. *Iranian Water Researches Journal* 4(7):33-46 (In Persian)
- Ghahraman B, Sepaskhah A R (2005) *Reservoirs operation management*. Iran-Water Resources Research 1(2):1-15 (In Persian)
- Hagbhin S, Alimohammadi S (2018) Development of flexible rule curve for reservoir operation via fuzzy

پس از بررسی عملکرد مخازن با حجم مشخص، با اعمال ضریب اعتمادپذیری مشخص به مدل‌سازی در نرم‌افزار LINGO. 17 با در نظر گرفتن حجم آب جمع‌آوری شده از بام، میزان تقاضای روزانه و همچنین ضریب اعتمادپذیری با اعمال محدودیت‌ها و قیود، حجم بهینه مخزن ذخیره‌سازی آب باران ارزیابی شده و برای ساختمان‌های مورد مطالعه با مساحت بام‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ مترمربع، متوسط حجم مخزن ذخیره‌سازی آب باران با اعتمادپذیری بالای ۹۰٪ به ترتیب ۳/۸۸، ۶/۰۹، ۸/۱۷ و ۱۰/۲۶ مترمکعب برآورد گردیده است.

- Qaderi K, Samani J M V, Mousavi S J, Eslami H R , Arab D R (2010) Optimal operation modeling of reservoirs using Mixed Integer Linear Programming (MILP). *Iran-Water Resources Research* 6(1):15-27 (In Persian)
- Rahimi D, Movahdi S, Barghi H (2010) Assessment of drought severity using normal precipitation index (Case study: Sistan and Baluchestan Province). *Geography and Environmental Planning* 20(4):43-56 (In Persian)
- RHRG (2001) Development Technology Unit, Recommendations for designing Rainwater Harvesting system tanks. Domestic Roofwater Harvesting Research Programme, O-DEV Contract No. ERB IC18 CT98 027, Milestone A6: Report A4, University of Warwick
- Rostad N, Foti R, Montalto F A (2016) Harvesting rooftop runoff to flush toilets: Drawing conclusions from four major U.S. Cities. *Resources, Conservation & Recycling* 108:97-106
- Sample D, Liu J (2014) Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal of Cleaner Production* 75:174-194
- Silva S S, Ghisi E (2016) Uncertainty analysis of daily potable water demand on the performance evaluation of rainwater harvesting systems in residential buildings. *Journal of Environmental Management* 180:82-93
- Ward S, Memon F A, Butler D (2010) Rainwater harvesting: Model-based design evaluation. *Water Science & Technology* 61:85-96
- approach. *Iran-Water Resources Research* 13(4):132-143 (In Persian)
- Kinkade-Levario H (2007) *Design for water*. New Society Publishers, 240 Pages
- Lee K E, Mokhtar M, Hanafiah M M, Halim A A, Badusah J (2016) Rainwater harvesting as an alternative water resource in Malaysia: Potential. *Policies and Development Journal of Cleaner Production* 126:1-5
- Loucks D P, Van Beek E (2005) *Water resources systems planning and management*. UNESCO
- Meftah Halaghi M, Dehghani A A, Mosaedi A, Eslami H R (2011) Estimation of shortage volume of Voshmgir reservoir in multi dam systems operation. *Journal of Water and Soil Conservation* 18(1):215-231
- Mun J S, Han M Y (2012) Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system: Definition, sensitivity and verification. *Journal of Environmental Management* 93:147-153
- Nguyena D C, Han M Y (2017) Proposal of simple and reasonable method for design of rainwater harvesting system from limited rainfall data. *Resources, Conservation & Recycling* 126:219-227
- Okoye C O, Solyalib O, Akintug B (2015) Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems: A linear programming approach. *Resources, Conservation and Recycling* 104:131-140
- Pelak N, Porporto A (2016) Sizing a rainwater harvesting cistern by minimizing costs. *Journal of Hydrology* 541:1340-1347