

بررسی پتانسیل ذخیره‌ی آب باران و قابلیت اطمینان مخازن سامانه استحصال آب باران: مقایسه‌ی بین شمال، مرکز و غرب تهران

اویس ملایی خلیلی‌ها^{۱*}، مهدی کوچک‌زاده^۲ و فرشته حقیقی^۳

چکیده

با توجه به وضعیت اقلیمی و مصارف بیش از حد آب در اکثر شهرهای بزرگ می‌توان مشکل کم‌آبی را تا حد مطلوبی با استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران کاهش داد. «قابلیت اطمینان» به درصدی از کل روزهای سال گفته می‌شود که بتوان توسط آب جمع‌آوری شده در مخازن، تقاضای موردنظر ساکنان را تأمین کرد. «پتانسیل ذخیره‌ی آب باران» به حجمی از رواناب گفته می‌شود که قبل از تبدیل به سیلاب توسط مجموعه‌ای از اقدامات در مخزن ذخیره شود و مورد استفاده قرار گیرد. هدف از این تحقیق، برآورد قابلیت اطمینان مخازن ذخیره‌سازی آب باران و بررسی پتانسیل ذخیره‌سازی آب باران بود. در این مطالعه، از برقراری بیلان آبی بین ورودی (بارندگی) و خروجی (سرانه مصرف خانگی) برای تجزیه و تحلیل عملکرد و طراحی بهینه حجم مخازن در سه منطقه متفاوت از تهران شامل مرکز، غرب و شمال استفاده شد. تفاوت در برخی از مشخصات این مناطق از قبیل میزان بارندگی و توپوگرافی قابل توجه است. تعدادی از نمودارهای قابلیت اطمینان مخازن آب باران برای مصارف داخلی در رابطه با حجم مخزن، مساحت پشت‌بام، تعداد افراد در یک خانه (تقاضای آب) و درصدی از کل نیاز آبی که توسط آب باران ذخیره‌شده تأمین می‌شود، ارائه شد. نتایج نشان داد که برای پشت‌بام با مساحت ۱۰۰ مترمربع، قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصد حتی با یک مخزن بسیار بزرگ (۱۰۰۰۰ لیتر) قابل دستیابی نیست، و اینکه قابلیت اطمینان مستقل از اندازه‌ی مخزن برای مخازن با اندازه‌های بزرگ‌تر از ۸۰۰۰-۵۰۰۰ لیتر بوده و وابسته به موقعیت مکانی منطقه است. همچنین، متوسط ذخیره‌ی آب باران در مخازن به صورت سالانه برای هر سه مکان تعیین شد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان ذخیره آب باران در مخزن برای پشت‌بام با مساحت ۳۰۰ مترمربع در شمال تهران و برابر با ۱۰۰ مترمربع بود، و کمترین ذخیره آب باران در مخزن برای پشت‌بامی با مساحت ۱۰۰ مترمربع (برابر با ۱۷ مترمربع) در غرب تهران بود. به‌طور کل، از نتایج مشخص شد که سامانه‌ی استحصال باران در منطقه‌ی شمال تهران از قابلیت اطمینان و همچنین امکان ذخیره‌ی آب باران بیشتری نسبت به مرکز و غرب تهران برخوردار است. ایستگاه‌های باران موردنظر (که در فاصله ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری از هم واقع شده‌اند) به‌علت تفاوت در شرایط تغییرات بارندگی و بعضاً توپوگرافی، نتایج آنها به‌طور محسوسی متفاوت بود. این نتایج نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان مخازن آب باران می‌تواند به‌طور قابل توجهی در یک شهر بزرگ مانند تهران متفاوت باشد که سبب تغییر در الگوی طراحی سامانه آب باران خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: شرایط اقلیمی، قابلیت اطمینان، مخازن ذخیره آب باران، مدل بیلان آبی.

ارجاع: ملایی خلیلی‌ها ا. کوچک‌زاده م. و حقیقی ف. ۱۳۹۹. بررسی پتانسیل ذخیره‌ی آب باران و قابلیت اطمینان مخازن سامانه استحصال آب باران: مقایسه‌ی بین شمال، مرکز و غرب تهران. مجله پژوهش آب ایران. ۳۸: ۹-۱.

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

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

۳- پژوهشگر گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: Mollavei55@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳

مقدمه

با افزایش جمعیت و تغییر اقلیم، سیستم‌های تأمین آب در بسیاری از شهرهای جهان تحت فشار قرار دارند (لی و همکاران، ۲۰۱۶). برای مقابله با این مشکل، اقدامات متعددی از جمله مدیریت تقاضا و شناسایی منابع جایگزین آب، مانند جمع‌آوری آب باران، استفاده‌ی مجدد از فاضلاب و آب شیرین‌کن می‌توانند مدنظر قرار گیرند. با توجه به وضعیت اقلیمی و مصارف بیش از حد آب در اکثر شهرهای بزرگ می‌توان مشکل کم‌آبی را تا حد مطلوبی با استفاده از سامانه‌ی جمع‌آوری آب باران کاهش داد. از آنجایی‌که حجم آب استحصال‌ی از پشت‌بام در بعضی از مناطق کشور قابل‌توجه است، می‌تواند بخشی از نیاز غیرشرب ساکنان ساختمان‌های مسکونی را تأمین کرد.

کومبس و کوکرا (۲۰۰۳) دریافته‌اند که برای یک ساختمان تک واحدی با مساحت پشت‌بام ۱۵۰ مترمربع و مخزن ۵-۱ مترمکعبی در سیدنی می‌تواند ۱۰ تا ۵۸ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کنند (بسته به تعداد ساکنان حاضر در ساختمان). نتایج آن‌ها نشان داد، بسته به مساحت پشت‌بام و تعداد افراد خانوار، استفاده از مخزن آب باران می‌تواند منجر به صرفه‌جویی سالانه آب از ۱۸ تا ۵۵ مترمکعب در مخازن ۱ مترمکعبی و ۲۵ تا ۱۴۴ مترمکعب در مخازن با ظرفیت ۱۰ مترمکعب شود. قیسی و همکاران (۲۰۰۹)، پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب را با استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در برزیل مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها برای شهرهای مورد مطالعه نشان داد که متوسط پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف آب ۱۲ تا ۷۹ درصد است. خستگور و جیاسوریا (۲۰۱۰)، قابلیت اطمینان مخازن آب باران را در مناطق اطراف ملبورن مورد بررسی قرار دادند و قابلیت اطمینان را با استفاده از مدل بیلان آبی روزانه محاسبه کردند. ایشان اندازه‌ی مخزن بهینه را برای مناطق اطراف ملبورن با توجه به داده‌های بارندگی روزانه، تقاضای آب باران و مساحت پشت‌بام برای قابلیت اطمینان ۹۰ درصد، ارائه کردند. موتوماران و همکاران (۲۰۱۱)، بیان کردند که استفاده از آب باران در مناطق مسکونی ویکتوریای استرالیا، می‌تواند سبب بیش از ۴۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب شود.

سانگ و همکاران (۲۰۰۹)، در مطالعه‌ای به بررسی قابلیت به‌کارگیری سامانه‌ی استحصال آب باران به‌عنوان یک گزینه پایدار برای تأمین آب در شهر Banda Aceh در

کشور اندونزی پرداختند. ایشان بیان داشتند که جمع‌آوری آب باران و استفاده از آن، همراه با آموزش و آگاه‌سازی مناسب مردم می‌تواند روشی مناسب و مفید برای تأمین آب از لحاظ اقتصادی، سادگی نصب و نگهداری باشد و نیاز آبی افراد منطقه را برآورده کند. بیسینگر و همکاران (۲۰۱۰) قابلیت اطمینان مخازن آب را به‌عنوان یک منبع تأمین آب برای مصارف فلاش‌تانک، آبیاری باغ و سامانه‌های تهویه مطبوع در ساختمان‌های مسکونی چند واحدی در نیویورک سیتی بررسی کردند. این محققان دریافته‌اند که آب باران جمع‌آوری شده می‌تواند نیازهای آب آبیاری باغ و سامانه‌های تهویه مطبوع را با یک قابلیت اطمینان نسبتاً بالا (۹۰-۸۰ درصد) تأمین کند. با این حال، آب باران جمع‌آوری شده برای تأمین مصرف فلاش‌تانک از قابلیت اطمینان نسبتاً پایینی (۱۰ تا ۴۰ درصد) برخوردار خواهد بود.

کمپسانو و مدیکا (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای که انجام دادند به این نتیجه رسیدند که در بسیاری از نقاط دنیا، روش‌های صرفه‌جویی آب در مصارف داخلی به‌دلیل افزایش تقاضای آب در مناطق شهری افزایش یافته است، که یکی از این روش‌ها، جمع‌آوری آب باران است که می‌تواند برای مصارفی از قبیل فلاش‌تانک، لباس‌شویی و غیره مورد استفاده قرار گیرد. روستاد و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد سامانه‌های جمع‌آوری آب باران را از نظر ذخیره‌سازی آب آشامیدنی و کاهش رواناب، برای چهار منطقه‌ی بزرگ شهری ایالات متحده (نیویورک سیتی، فیلادلفیا، شیکاگو و سیاتل) بررسی کردند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که سامانه‌ی استحصال آب باران، شامل پشت‌بامی به مساحت ۱۰۰ مترمربع که به مخزن ۵ مترمکعبی متصل است، قادر به کاهش ۶۵ درصدی تقاضای آب آشامیدنی در تمام شهرها خواهد بود و همچنین، رواناب حاصل از پشت‌بام را ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. نوترا و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد سیستم‌های استحصال آب باران را به‌عنوان یک منبع جایگزین آب در شرایط کم‌آبی در جنوب ایتالیا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که سامانه‌های استحصال آب باران نسبت به روش‌های سنتی تأمین آب در این منطقه، می‌تواند مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی داشته باشد.

در راستای طراحی بهینه‌ی سامانه‌های استحصال آب باران و با توجه به ضرورت بررسی کمی حجم مخازن و

باقیمانده از منبع آب شهر (آب لوله‌کشی) تأمین می‌شود. مدل ذخیره‌سازی آب باران در مخزن، استفاده از آب باران، سرریز و استفاده از آب لوله‌کشی را به صورت روزانه محاسبه می‌کند. فرایند کلی می‌تواند به صورت ریاضی طبق معادله‌ی زیر شرح داده شود:

معادله‌ی آب تجمعی ذخیره‌شده در مخزن:

$$S_t = V_t + S_{t-1} - D \quad (1)$$

$$S_t = 0 \text{ for } S_t < 0 \quad (2)$$

$$S_t = C \text{ for } S_t > C \quad (3)$$

S_t ، آب تجمعی ذخیره‌شده در مخزن (لیتر) پس از پایان روز t ام است؛ V_t ، آب باران جمع‌آوری شده (لیتر) در روز t ام است؛ S_{t-1} ، ذخیره‌سازی در مخزن (لیتر) در آغاز روز t ام است؛ D ، تقاضای روزانه ساکنان (لیتر) است؛ و C ، ظرفیت مخزن (لیتر) است.

معادله استفاده از آب شهر (آب لوله‌کشی):

$$TW = D - S_t \text{ for } S_t < D \quad (4)$$

TW ، استفاده از آب لوله‌کشی در روز t ام است (لیتر).

معادله‌ی سرریز:

$$OF = S_t - C \text{ for } S_t > C \quad (5)$$

که در آن OF ، سرریز در روز t ام (لیتر) است.

درصد کل روزهای سال برای تأمین نیازهای غیرشرب برای ساکنان بر اساس معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود (ایمتیز و همکاران، ۲۰۱۱a):

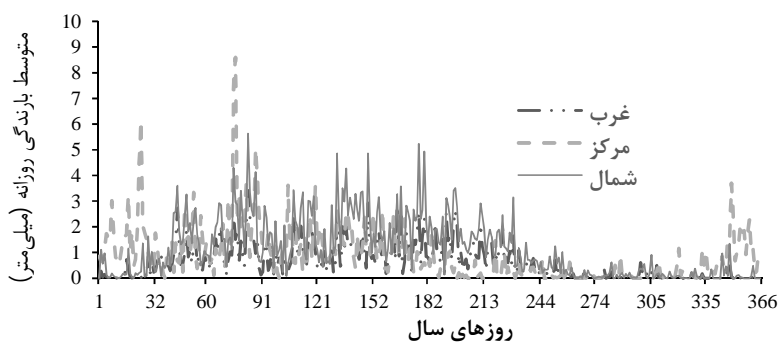
$$Re = \frac{N-U}{N} \times 100 \quad (6)$$

که در آن: Re ، درصد روزهای تأمین نیازهای غیرشرب؛ U ، تعداد روزهایی از سال که نیاز غیرشرب ساکنان در شرایط موردنظر تأمین نمی‌شود؛ و N ، تعداد کل روزها در یک سال خاص است.

امکان‌پذیری اجرای صحیح این سامانه‌ها، هدف از این تحقیق، برآورد قابلیت اطمینان مخازن ذخیره‌سازی آب باران و بررسی پتانسیل ذخیره‌سازی آب باران در سه منطقه شمالی، مرکزی و غربی شهر تهران است.

مواد و روش‌ها

بیلان آبی مبتنی بر میزان بارش روزانه، مساحت حوزه (پشت‌بام)، تلفات ناشی از تبخیر، نشست و نفوذ، حجم مخزن و تقاضای روزانه آب ساکنان، توسعه یافته است. در این مدل، ورودی اولیه، میزان بارش روزانه‌ی منطقه است. داده‌های بارش (دوره ۲۰-۳۰ ساله) برای مناطق مورد مطالعه از سازمان هواشناسی ایران جمع‌آوری شدند. ایستگاه هواشناسی مهرآباد، ژئوفیزیک و شمیران به ترتیب در غرب، مرکز و شمال تهران واقع شده‌اند. اگر بارش روزانه را در مساحت پشت‌بام ضرب کرده و از حاصل میزان تلفات کسر شود، حجم رواناب روزانه محاسبه می‌شود. برای این مطالعه به‌طور متوسط ۱۵ درصد از حجم رواناب روزانه به‌عنوان تلفات (نشست، تبخیر و نفوذ) در نظر گرفته شد (میزان تلفات در هر رویداد بارش بسته به شدت بارش، مدت بارش و فاصله بارش تا بارش قبلی متفاوت است). رواناب تولیدشده به مخزن ذخیره‌سازی مرتبط، هدایت می‌شود. ظرفیت ذخیره‌سازی موجود با رواناب روزانه‌ی تجمعی مقایسه شد. در صورتی که رواناب جمع‌شده بزرگ‌تر از حجم ذخیره‌سازی موجود بود، آب اضافی (سرریز) از رواناب جمع‌شده کسر می‌شود. در صورتی که مقدار آب کافی در مخزن ذخیره‌سازی وجود داشته باشد، مقدار تقاضای آب ساکنان (D) از مقدار رواناب جمع‌شده (مقدار رواناب ذخیره‌شده) کسر می‌شود. در شرایطی که مقدار آب کافی در مخزن ذخیره‌سازی در دسترس نباشد، فرض مدل بر این است که تقاضای آب

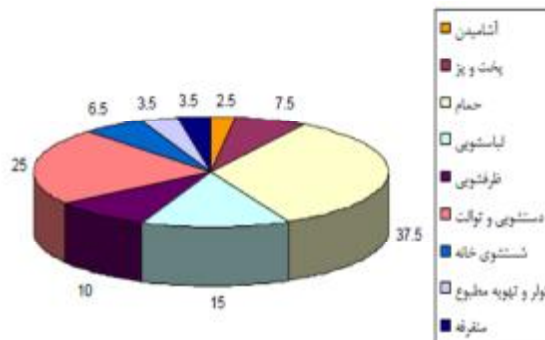


شکل ۱- مقایسه‌ی میانگین بارندگی روزانه برای مناطق مورد مطالعه (شروع از اول مهرماه)

مخزن آب باران تأمین شود، شبیه‌سازی شد. شکل ۲، متوسط سرانه‌ی مصرف داخلی را بدون احتساب فضای سبز برای خانوارهای تهرانی ارائه می‌دهد. برای ارزیابی اثر مساحت پشت‌بام، سه مساحت پشت‌بام ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مترمربع در نظر گرفته شد. در مورد تعداد ساکنان (یعنی تقاضای کل آب)، سه سناریو ۴، ۸ و ۱۲ نفر مورد بررسی قرار گرفت. مقدار آب غیرشرب موردنیاز به‌طور متوسط ۸۰ لیتر در شبانه‌روز برای هر نفر بر اساس مطالعه‌ی قبلی توسط رشیدی مهرآبادی و همکاران (۲۰۱۳) در نظر گرفته شد و سطح انتظار تأمین آب از سیستم ذخیره‌سازی آب باران در مخازن در دو سناریو ۶۰ و ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. منحنی‌های چند رابطه‌ای برای نشان دادن آثار پارامترهای مختلف بر قابلیت اطمینان مخازن باران در شرایط مختلف آب و هوایی ارائه شد.

نتایج و بحث

سامانه‌ی استحصال آب باران از سطح پشت‌بام ساختمان‌ها در مناطق موردنظر تهران در برنامه‌ی Matlab و بر اساس معادلات بیان شده، شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی سامانه، حجم آب باران قابل استحصال از سطح پشت‌بام، حجم آب ذخیره آب باران در مخازن و قابلیت اطمینان به‌صورت روزانه برای کل دوره‌ی آمار بارندگی مناطق موردنظر محاسبه شد. شکل ۳، بیانگر قابلیت اطمینان برای تأمین نیاز غیرشرب روزانه برای ساکنان مناطق موردنظر تهران در حجم‌های مختلف مخازن برای مساحت پشت‌بام‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مترمربعی است. از شکل ۳ مشخص است که با افزایش حجم مخازن، تعداد روزهایی از سال که بتوان تقاضای غیرشرب را به‌وسیله‌ی آب باران تأمین کرد، افزایش می‌یابد. در شمال تهران، بیشترین تعداد روزهای سال، که حداقل ۸۰٪ نیازهای غیرشرب روزانه‌ی ساکنان از آب باران قابل تأمین است، برابر با ۳۴٪ برای شرایط مساحت پشت‌بام ۱۰۰ مترمربعی، نیاز غیرشرب روزانه ۳۲۰ لیتر در روز، و حجم مخزن ۱۰۰۰۰ لیتر است؛ و همچنین، کمترین این مقدار، برابر با ۱۳٪ برای شرایط مساحت پشت‌بام ۳۰۰ مترمربعی، نیاز غیرشرب روزانه ۹۶۰ لیتر در روز، و حجم مخزن ۱۰۰۰ لیتر است (شکل ۳-الف). با افزایش حجم مخزن، تعداد روزهای تأمین نیاز غیرشرب روزانه‌ی ساکنان افزایش پیدا می‌کند؛ ولی با افزایش نیاز غیرشرب روزانه، قابلیت اطمینان کاهش پیدا



شکل ۲- متوسط سرانه‌ی مصرف داخلی برای سال ۱۳۹۵ (نشریه شماره ۳-۱۱۷)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی مکان‌های مطالعه

ویژگی	غرب	مرکز	شمال
عرض جغرافیایی	۳۵ ۴۱N	۳۵ ۴۴N	۳۵ ۴۸N
طول جغرافیایی	۵۱ ۱۹E	۵۱ ۲۳E	۵۱ ۲۹E
متوسط ارتفاع (m)	۱۱۹۰/۸	۱۴۱۸/۶	۱۵۴۹/۱
توپوگرافی	مسطح	مسطح	کوهپایه‌ای

جدول ۲- ویژگی‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی

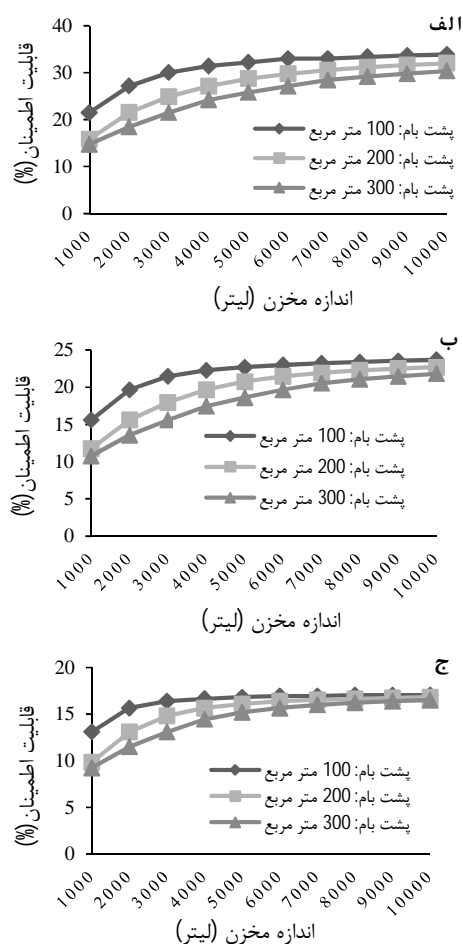
	غرب	مرکز	شمال
میانگین (mm)	۲۳۲/۷۱	۳۱۸/۸۱	۴۱۷/۷۸
میان (mm)	۲۳۹/۱	۲۹۵/۶۴	۴۲۱/۷۶
انحراف معیار	۶۷/۵۶	۱۱۶/۳۸	۱۱۰/۱۴
ماکزیمم (mm)	۳۵۵/۶۴	۷۷۰/۱	۶۶۹/۴۶
مینیمم (mm)	۱۱۵/۲۸	۱۲۲/۴	۲۳۲/۸۶
بازه زمانی (years)	۳۰	۲۶	۲۹

شکل ۱، متوسط بارندگی روزانه را برای مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین، ویژگی‌های فیزیکی سه منطقه انتخاب‌شده در جدول ۱ ارائه شده است. از جدول ۱، مشخص است که شمال تهران در ارتفاع بالاتری از مرکز و غرب تهران واقع شده است. برای شمال، مرکز و غرب تهران داده‌های بارش روزانه به‌ترتیب، ۲۹ سال (۱۹۸۸-۲۰۱۶)، ۲۶ سال (۱۹۹۱-۲۰۱۶) و ۳۰ سال (۱۹۸۷-۲۰۱۶) در دسترس بود. جدول ۲، آمار بارندگی را برای سه محل مورد مطالعه خلاصه می‌کند که نشان می‌دهد که شمال تهران بارندگی بسیار بالاتری نسبت به غرب و مرکز تهران دارد.

بیلان آبی روزانه با استفاده از داده‌های بارندگی اشاره‌شده در بالا برای ظرفیت مختلف مخازن آب باران از ۱۰۰۰ لیتر تا ۱۰۰۰۰ لیتر (با گام تغییر ۱۰۰۰ لیتر) و درصدی از کل تقاضای آب (تقاضای غیرشرب ساکنان) که توسط

شکل ۴ الف، برای نشان دادن تمایز بین قابلیت اطمینان در شمال، مرکز و غرب تهران، منحنی‌های قابلیت اطمینان را به‌عنوان تابعی از اندازه‌های مختلف مخزن در سناریوهای متفاوت تقاضا (۶۰ و ۸۰ درصد) برای یک خانوار چهار نفره (کل تقاضای آب غیرشرب ۳۶۰ لیتر در روز) که به پشت‌بام ۱۰۰ مترمربعی متصل است، نشان می‌دهد. از شکل ۴ (نمودار الف)، مشخص است که قابلیت اطمینان مخازن آب باران در شمال تهران بیشتر از مرکز و غرب تهران است. همان‌طور که از شکل هم پیداست، ۱۰۰٪ قابلیت اطمینان با سطح پشت‌بام ۱۰۰ مترمربع قابل دسترسی نیست؛ این مساحت پشت‌بام برای جمع‌آوری مقدار مناسب بارندگی بسیار کوچک است. در این مورد، باران جمع‌آوری شده به سرعت مورد استفاده قرار می‌گیرد و مخزن تا رسیدن یک رویداد بارندگی بعدی خالی باقی خواهد ماند. برای مخازن بزرگ‌تر، اگر سطح پشت‌بام افزایش نیافته باشد، قابلیت اطمینان ثابت خواهد ماند، که در این صورت، بخشی از حجم مخزن یا کل حجم مخزن در بیشتر زمان خالی می‌ماند؛ زیرا سطح پشت‌بام برای جمع‌آوری آب باران به مقدار کافی، خیلی کوچک است و یا این‌که تقاضا برای استفاده از آب بسیار زیاد است (ایمتیز و همکاران، ۲۰۱۱b). با شرایط فعلی، حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی تقریباً برای شمال، مرکز و غرب تهران به ترتیب ۴۷، ۳۴ و ۲۵ درصد است. با این‌حال، با افزایش تقاضای آب باران، حداکثر قابلیت اطمینان برای شمال تهران (~۴۷٪) بالاتر از حداکثر قابلیت اطمینان در مرکز تهران (~۳۴٪) و غرب تهران (~۲۵٪) است. همچنین، پیداست که در مرکز و غرب تهران مقادیر قابلیت اطمینان برای مخزن بزرگ‌تر از ۵۰۰۰ لیتر ثابت است. با این‌حال، این آستانه‌ی اندازه‌ی مخزن برای شمال تهران ۷۰۰۰ لیتر است. در شرایط مشابه با سناریوهای خانگی ۸ و ۱۲ نفره میزان قابلیت اطمینان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۴ (نمودار ب و ج) نشان داده شده است، حداکثر قابلیت اطمینانی که می‌توان برای سناریوهای ۸ و ۱۲ نفر به آن رسید به ترتیب برابر با ۴۳ و ۴۰ درصد (برای ۶۰٪ تقاضا در شمال تهران) است. در حالی که برای سناریوی خانگی چهار نفره، حداکثر قابلیت اطمینان قابل دستیابی ۴۷٪ (برای ۶۰٪ تقاضا در شمال تهران) خواهد بود. شکل ۴، تغییرات قابل محسوسی را در دستیابی به حداکثر

کرده است (ایمتیز و همکاران، ۲۰۱۲). با توجه به شکل ۳ ب، می‌توان بیان داشت که در مرکز تهران، بیشترین تعداد روزهای تأمین برای نیازهای غیرشرب روزانه ۳۲۰ و ۶۴۰ لیتر، و برای حجم مخازن بزرگ، برابر ۲۴٪ کل روزهای سال است. برای مساحت پشت‌بام ۳۰۰ مترمربع و حجم مخزن بیش از ۱۰۰۰۰ لیتر، قابلیت اطمینان ثابت و برابر با ۲۲٪، و برای مساحت پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مترمربعی، قابلیت اطمینان از حجم مخزن ۶۰۰۰ لیتر به بالا، ثابت و به ترتیب برابر ۲۱٪ و ۲۲٪ است. قابلیت اطمینان در غرب تهران در محدوده‌ی ۹ تا ۱۷ درصد است (شکل ۳ ج). به‌طور میانگین، تعداد روزهای تأمین برای حجم‌های مختلف مخازن برای مساحت پشت‌بام‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مترمربعی به ترتیب برابر با ۱۶.۳۶٪، ۱۵.۲۶٪ و ۱۴.۴۲٪ کل روزهای سال است (شکل ۳ ج).

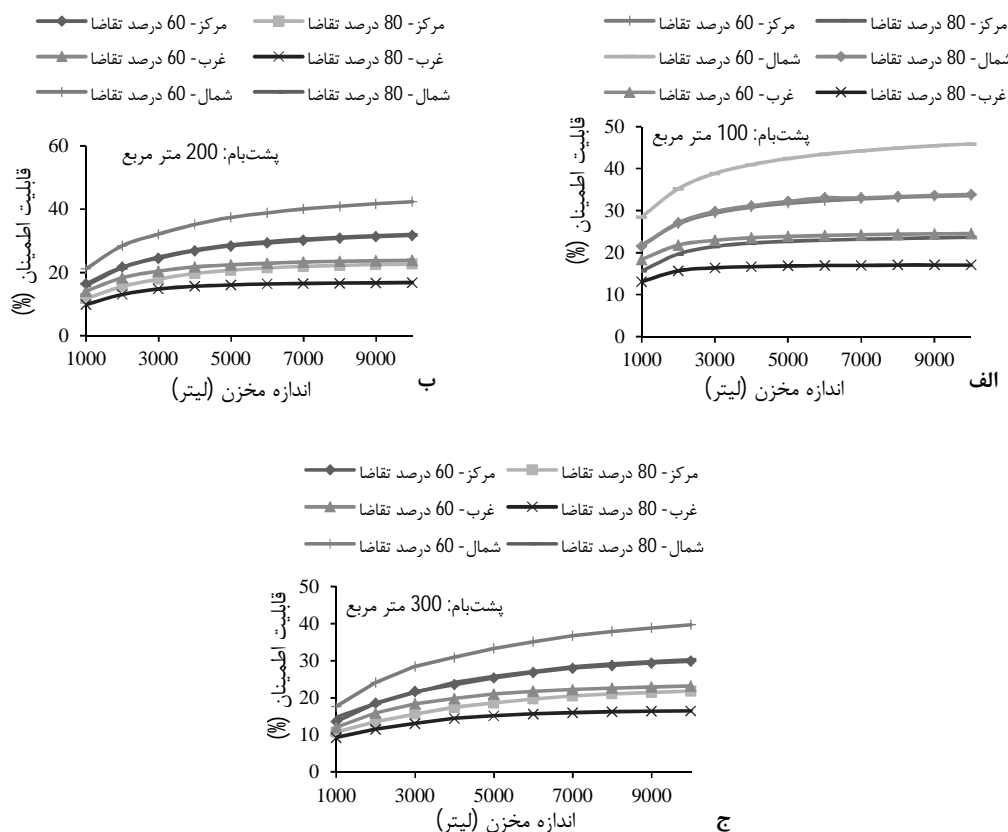


شکل ۳- قابلیت اطمینان برای تقاضا و مساحت پشت‌بام‌های مختلف در مناطق الف) شمال، ب) مرکز و ج) غرب تهران آستانه حداقل تأمین نیاز ۸۰ درصد

عواملی مانند فضای مخزن و هزینه‌ی خرید مخزن نیز بر انتخاب یک مخزن خاص تأثیرگذار هستند. قابلیت اطمینان زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که آب شیرین قابل عرضه نیست و یا زمانی که در منطقه یا شهر موردنظر یک دوره‌ی خشکسالی طولانی رخ داده باشد و باید برای مقابله با قابلیت دسترسی محدود آب و تقاضای آب زیاد، تلاش کرد. بنابراین، یک سیستم استحصال آب باران از پشت‌بام می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی در راستای کاهش آثار خشکسالی در منطقه‌ی مورد مطالعه قرار گیرد (ابوزریب و شاتاوی، ۲۰۱۳؛ کومه و تاجبخش ۲۰۱۷).

قابلیت اطمینان به دلیل تغییر در تعداد افراد خانوار نشان می‌دهند. در تمام سناریوهای بالا، می‌توان نتیجه گرفت که میزان قابلیت اطمینان در منطقه به میزان بارش و شرایط منطقه بستگی دارد.

با توجه به موارد ذکرشده، می‌توان نتیجه گرفت که قابلیت اطمینان سیستم استحصال آب باران به‌واسطه‌ی اقلیم (بارش منطقه) و مساحت پشت‌بام محدود می‌شود. همچنین، باید گفت که قابلیت اطمینان سیستم، تنها عامل تعیین‌کننده در انتخاب اندازه‌ی مخزن نیست؛ چرا که خانه‌ها در یک منطقه یا شهر بزرگ مانند تهران غالباً دارای منبع آب شهری یا لوله‌کشی هستند و از این‌رو،



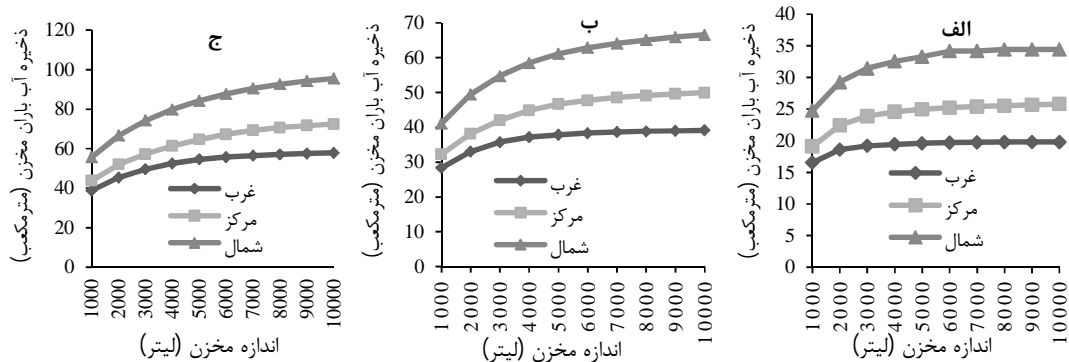
شکل ۴- مقایسه‌ی قابلیت اطمینان برای خانوارهای الف (۴، ب) ۸ و ج) ۱۲ نفره در مرکز، غرب و شمال تهران

پشت‌بام‌های با مساحت کوچک، مخزن پر نمی‌شود و سرریز رواناب از مخزن اغلب در پشت‌بام‌های بزرگ انجام می‌شود که می‌توان با افزایش حجم مخزن، سرریز رواناب از مخزن را کاهش داد و بر میزان ذخیره آب باران افزود. طبق شکل ۵ که ذخیره آب باران را در این سه منطقه از تهران نشان می‌دهد، برای حداقل ۸۰ درصد تقاضای

شکل ۵، ذخیره‌ی آب باران در مخازن را با حجم‌های مختلف برای مساحت پشت‌بام و تقاضاهای متفاوت نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان گفت که تأثیر افزایش حجم مخزن در ذخیره‌ی آب باران برای پشت‌بام‌ها با مساحت بزرگ‌تر، بیشتر از پشت‌بام‌های با مساحت کوچک است (ایمتیز و همکاران، ۲۰۱۱b)؛ زیرا در

آب باران در مخزن از پشت‌بام ۳۰۰ مترمربعی با یک مخزن ۱۰۰۰۰ لیتری برای شمال تهران انجام می‌شود که می‌تواند ۱۰۰۰۰۰ لیتر در سال آب باران را ذخیره کند. برای مخازن کوچک‌تر، افزایش مساحت پشت‌بام به اندازه‌ی مخازن بزرگ تأثیری ندارد؛ زیرا مخازن بزرگ فضای لازم را برای ذخیره‌ی رواناب اضافی حاصل از افزایش سطح پشت‌بام دارند؛ ولی در مخازن کوچک این حجم رواناب اضافی اغلب به‌صورت سرریز از مخزن اتلاف خواهد شد. در حقیقت، می‌توان این‌گونه بیان کرد که چنانچه اندازه‌ی مخزن بزرگ‌تر انتخاب شود، آب بارانی که از سطح پشت‌بام به مخزن جریان می‌یابد، به‌طور مؤثرتری جمع‌آوری و استفاده می‌شود. در واقع، از نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که ذخیره‌ی سالانه‌ی آب باران برای مصارف غیرشرب در شمال تهران به مقدار قابل توجهی بیشتر از مرکز و غرب تهران است. با توجه به نتایج، اگر حجم مخزن و تقاضای موردنیاز ساکنان بر اساس سطح پشت‌بام، بارندگی و تعداد روزهای موردنیاز برای ذخیره‌سازی محاسبه شود، ذخیره‌ی آب باران در مخزن به حداکثر خود می‌رسد و تعداد روزهای تأمین آب باران افزایش خواهد یافت (رشیدی مهرآبادی و حقیقی فشی، ۲۰۱۳).

غیرشرب روزانه‌ی آب باران، بیشترین ذخیره‌سازی آب باران برای پشت‌بام با مساحت ۳۰۰ مترمربع برای شمال تهران است که تقریباً برابر با ۱۰۰ مترمکعب است. و کمترین ذخیره‌سازی برای پشت‌بام با مساحت ۱۰۰ مترمربع برای غرب تهران است که مقدار آن برابر با ۱۷ مترمکعب است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش مساحت پشت‌بام (سطح استحصال آب باران) میزان ذخیره‌ی آب باران در مخازن افزایش می‌یابد که در پشت‌بام‌های کوچک‌تر (۱۰۰ تا ۲۰۰ مترمربع) نسبت به پشت‌بام‌های بزرگ‌تر ملموس‌تر است (هاشم و همکاران، ۲۰۱۳). ذخیره‌ی آب باران در مخازن برای پشت‌بام‌های بزرگ تقریباً ثابت است؛ به این معنی که با توجه به بیشترین ظرفیت میزان جمع‌آوری آب باران و تقاضای روزانه آب غیرقابل شرب استفاده از مخازن بزرگ اثر کمی در تأمین آب خواهد داشت. ذخیره‌ی آب باران برای پشت‌بام‌های با مساحت ۱۰۰ و ۳۰۰ مترمربع برای شمال تهران به‌ترتیب تقریباً برابر با ۳۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ لیتر در سال و ثابت است. برای مرکز تهران، این کمیت به‌ترتیب برابر با ۲۶۰۰۰ و ۷۲۰۰۰ لیتر در سال و همچنین، در غرب تهران برای پشت‌بام‌های با مساحت ۱۰۰ و ۳۰۰ مترمربع ذخیره‌ی آب باران به‌ترتیب تقریباً برابر با ۲۰۰۰۰ و ۵۸۰۰۰ لیتر در سال و ثابت است. بیشترین ذخیره‌ی



شکل ۵- مقایسه‌ی ذخیره‌ی سالانه آب باران در مخزن برای تقاضاها و مساحت پشت‌بام‌های الف) ۱۰۰، ب) ۲۰۰، ج) ۳۰۰ و ۱۲ نفر و ۳۰۰ مترمربع در شمال، مرکز و غرب تهران (آستانه‌ی حداقل تأمین نیاز ۸۰ درصد)

نتیجه‌گیری

ارزیابی قرار داد، نتایج نشان داد که برای یک مساحت پشت‌بام نسبتاً کوچک (۱۰۰ مترمربع) دستیابی به قابلیت اطمینان ۱۰۰ درصد حتی با اندازه‌ی مخازن بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ لیتر امکان‌پذیر نخواهد بود. قابلیت اطمینان مستقل از اندازه مخزن برای مخازن بزرگ‌تر از ۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰ لیتر و وابسته به شرایط آب و هوایی منطقه در

این مطالعه، قابلیت اطمینان مخازن آب باران را در سه منطقه متفاوت (شمال، مرکز و غرب) از تهران تحت سناریوهای مختلف، شرایط اقلیمی، مساحت پشت‌بام، اندازه‌ی مخزن، تعداد افراد خانوار و بخشی از تقاضا که بایستی به‌طور کامل توسط آب باران تأمین شود، مورد

منابع

1. Abu-Zreig M. and Shatanawi M. 2013. Evaluation of residential rainfall harvesting systems in Jordan. *Urban Water Journal*. 10: 105-111.
2. Basinger M. Montalto F. and Lall U. 2010. A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal Hydrology*. 392(3-4): 105-118.
3. Campisano A. and Modica C. 2011. Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling*. 63: 9-16.
4. Coombes P. and Kuczera G. 2003. Analysis of the performance of rainwater tanks in Australian capital cities. In 28th International Hydrology and Water Resources Symposium: About Water; Symposium Proceedings. Institution of Engineers, Australia, p. 2.
5. Ghisi E. Tavares D. F. and Rocha V. L. 2009. Rainwater harvesting in petrol stations in Brasilia: potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 54: 79-85.
6. Hashim H. and Hudzori A. Ho W. S. 2013. Simulation based programming for optimization of large-scale rainwater harvesting system: Malaysia case study. *Resources, Conservation and Recycling*. 80: 1-9.
7. Imteaz M. A. Shanableh A. Rahman A. and Ahsan A. 2011a. Optimization of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 55: 1022-1029.
8. Imteaz M. A. Ahsan A. and Rahman A. 2011b. Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling*. 56: 80-86.
9. Imteaz M. A. and Ahsan A. 2012. Reliability analysis of rainwater tanks: A comparison between South-East and Central Melbourne. *Resources, Conservation and Recycling*. 66: 1-7.
10. Khastagir A. and Jayasuriya N. 2010. Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*. 381: 181-8.
11. Komeh Z. and Tajbakhsh S. M. 2017. Reservoir volume optimization and performance evaluation of rooftop catchment systems in arid regions: A case study of Birjand, Iran. *Water Science and Engineering*. 10: 125-133
12. Lee K. E. Mokhtar M. Hanafiah M. M. Halim A. A. and Badusah J. 2016.

تهران است. با افزایش تقاضا در مخازن کوچک، قابلیت اطمینان به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (حدود ۱۰ درصد). همچنین، مشخص شد که قابلیت اطمینان مخازن برای شمال تهران بیشتر از مرکز و غرب تهران است. برای یک مساحت پشت‌بام بزرگ (۳۰۰ مترمربع) و تقاضای زیاد (۹۶۰ لیتر در روز) در شمال تهران برای اندازه‌ی مخازن بزرگ‌تر از ۱۰۰۰۰ لیتر دستیابی به قابلیت اطمینان بالاتر از ۴۰ درصد امکان‌پذیر خواهد بود، که این قابلیت اطمینان برای مرکز و غرب تهران به‌ترتیب برابر با ۳۰ و ۲۲ درصد برآورد شد. به‌طورکلی، در این مناطق به دلیل تقاضای بالای آب غیرشرب (۸۰ لیتر به‌ازای هر نفر در روز)، دستیابی به قابلیت اطمینان بالا (حدود ۱۰۰ درصد) امکان کمی دارد.

با استفاده از داده‌های بارش، میزان ذخیره‌ی آب باران در مخزن برای سه منطقه به‌دست آمد؛ همان‌طور که از نتایج هم پیداست، با افزایش مساحت پشت‌بام میزان ذخیره‌ی آب باران در مخازن افزایش می‌یابد که در پشت‌بام‌های کوچک‌تر (۱۰۰ تا ۲۰۰ مترمربع) نسبت به پشت‌بام‌های بزرگ‌تر ملموس‌تر است. ذخیره‌ی آب باران در مخازن برای پشت‌بام‌های بزرگ تقریباً ثابت است؛ برای مخازن کوچک‌تر، افزایش مساحت پشت‌بام به اندازه‌ی مخازن بزرگ تأثیری ندارد؛ زیرا در مخازن بزرگ آب بارانی که از سطح پشت‌بام به مخزن جریان می‌یابد، به‌طور مؤثرتری جمع‌آوری و استفاده می‌شود. در واقع، برای اندازه‌ی مخازن کوچک (کوچک‌تر از ۸۰۰۰ لیتر در شمال تهران، و کوچک‌تر از ۵۰۰۰ لیتر در مرکز و غرب تهران) با افزایش مساحت پشت‌بام، مقدار ذخیره‌ی آب باران به‌صورت خطی افزایش پیدا کرد. همین‌طور، نتایج نشان داد که ذخیره‌ی آب باران در شمال تهران به مقدار قابل توجهی بیشتر از مرکز و غرب تهران است.

ایستگاه‌های باران موردنظر (که در فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری از هم واقع شده‌اند) به‌علت تفاوت در شرایط تغییرات بارندگی و بعضاً توپوگرافی، نتایج آنها به‌طور محسوسی متفاوت بود. این نتایج نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان مخازن آب باران می‌تواند به‌طور قابل توجهی در یک شهر بزرگ مانند تهران متفاوت باشد که سبب تغییر در الگوی طراحی سامانه‌ی آب باران خواهد شد.

- 'Rainwater harvesting as an alternative water resource in Malaysia: potential, policies and development'. *Journal of Cleaner Production*. 126: 218-222.
13. Muthukumaran S. Baskaran K. and Sexton N. 2011. Quantification of potable water savings by residential water conservation and reuse –a case study. *Resources, Conservation and Recycling*. 55: 945-52.
 14. Notaro V. Liuzzo L. and Freni G. 2016. Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Systems in Southern Italy., *Procedia Engineering*. Elsevier. 162: 373-380.
 15. Rashidi Mehrabadi M. H. R and Fashi F. H. 2013. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*. 73: 86-93.
 16. Rostad N. Foti R. and Montalto F. A. 2016. Harvesting rooftop runoff to flush toilets: Drawing conclusions from four major U.S. cities. *Resources, Conservation and Recycling*. 108: 97-106.
 17. Silva C. M. and Carvalho N. V. 2015. Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. *Resources, Conservation and Recycling*. 94: 21-34.
 18. Song J. Han M. Kim T. and Song J. 2009. Rainwater harvesting as a sustainable water supply option in Banda Aceh. *Journal of Desalination*. 248: 233-240.

