




The suitable method for rainfall hyetograph extracting in dry areas via hourly rainfall and under the climate change scenarios

Zahra Farahnakian¹, Reza Ghazavi²✉ 

1. M.S. student, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Esfahan, Iran. E-mail: zahra.frahnakiannn@gmail.com
2. Corresponding author, Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan. E-mail: ghazavi@kashanu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:
Received July 23, 2024
Received in revised form
August 18, 2024
Accepted August 27, 2024
Available online September
22, 2024

Keywords:
Precipitation hyetograph,
Intensity-Duration-Frequency
(IDF) curves,
forecast period,
water resource management.

Objective: In this research, triangular (Yen and Chao) and periodic block methods were used to calculate and draw precipitation hyetograph in Kashan synoptic station as an indicator station of dry areas.

Method: In order to investigate the effect of climate change on precipitation in the study area, the general circulation model of the atmosphere and different climate scenarios were used. Then the frequency intensity curves for the base period (1993-2017) and the Znear future (2030-2011) and distant future (2050-2031) periods were drawn by using Kahraman-Abkhader relationship. In the following, the curves of intensity, duration, frequency of extraction and corresponding rainfall hyetograph were drawn based on triangular (Yen and Chau) and periodic block methods, and the results were compared with the rainfall patterns measured at the Kashan synoptic station.

Results: The results showed that in the study area, the maximum amount of precipitation occurred within 30 minutes after the beginning of the precipitation. The results showed that the precipitation hyetograph of the measured and predicted precipitation data is similar to the hyetograph drawn by the triangulation method (Yen and Chau).

Conclusions: According to the results, the triangular method (Yen and Chau) can be introduced as a suitable method for investigating the distribution of precipitation in dry areas.

Cite this article: Farahnakian, Z., & Ghazavi, R. (2024). The suitable method for rainfall hyetograph extracting in dry areas via hourly rainfall and under the climate change scenarios. *ECOHYDROLOGY*, 11 (3), 355-373. <http://doi.org/10.22059/ije.2024.383818.1844>



© Zahra Farahnakian, Reza Ghazavi.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ije.2024.383818.1844>

Publisher: University of Tehran.

Introduction

Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves and design rainfall are among the parameters that are widely used in water resource management projects and drainage system design (DS) at the watershed level (Gong et al., 20168). The design rain itself will generate the design flood (Bani Farzin et al., 2017). The histogram or time pattern of rainfall distribution shows some quantitative characteristics of a rainfall such as the maximum amount or the peak intensity of rainfall and the time position of its occurrence, the total duration of rainfall, the central point of rainfall and the time pattern (Ghobadi et al., 2018). Basically, the design rainfall is considered according to a certain probability level or a specific return period (T years) and the design hyetograph is also drawn for this rainfall and shows the temporal distribution of the design rainfall (Wang et al., 2017). The corresponding hydrograph is drawn with a common return period, and hydraulic designs (dimensions of channels, dimensions of overflows, etc.) are also done based on the characteristics of the design hydrograph. Flash floods are mainly caused by the pattern of rainfall distribution, and therefore more attention should be paid to rainfall changes and the effect of climate change on rainfall distribution.

The purpose of this study is to investigate the effect of climate change on the rainfall hyetograph in dry areas. In this study, while intensity-duration curves were drawn for a base period and based on different climate scenarios, precipitation was extracted from the curves, and precipitation hyetographs were drawn and compared for the base period under different climate scenarios.

Method

In this study, the effect of climate change on the amount and distribution of precipitation in the Kashan region was investigated. Then, intensity-duration curves of area abundance were drawn for the base period and forecast periods. To draw the rainfall hyetographs using the periodic block method, using intensity-duration curves, first the depth of precipitation was determined in n time intervals for a duration of Δt (the total precipitation is $[[T]]_d = n\Delta t$). Then the depth of precipitation corresponding to the intensity of precipitation is obtained. By subtracting the values of the depth of consecutive rainfall from each other, the amount of rainfall for each time unit is obtained. Finally, the rainfall hyetograph for the base period and future periods was drawn and compared based on the frequency intensity curves.

Results

The results of drawing the precipitation hyetograph with the Yen and Chau method for the base period and the forecast periods showed that the amount of precipitation during the different return periods has an increasing and decreasing trend, so that the maximum amount of precipitation in the base period in the period The returns of 2, 10, 25 and 50 years are respectively: 0.94, 1.71, 2.1 and 2.39. that these values are very close to the pessimistic scenario of 8.5, equal to: 0.94, 1.71, 2.09 and 2.38, respectively, and according to the optimistic scenario, the values are 8% compared to the base period. will decrease, it is equal to: 1, 1.82, 2.23 and 2.53, respectively. But according to the intermediate scenario of 4.5%, the maximum amount of precipitation will increase by 6% compared to the base period, equal to: 0.86, 1.71, 2.1 and 2.39, respectively. Also, the results showed that the values calculated under the 4.5 scenario increased by 16.27 percent compared to the 2.6 scenario. The calculated values under the 8.5 scenario increased by 9.30% compared to the 2.6 scenario, and the calculated values under the 8.5 scenario decreased by 6% compared to the 4.5 scenario.

Precipitation hyetograph is a graph that shows changes in precipitation over time. The flood hydrograph clearly shows a sharp peak where the upper and lower parts change

abruptly. Considering the relationship between rainfall and runoff and the effect of rainfall intensity on flash floods, it is necessary to investigate the rainfall hyetographs. In this study, a triangular shape is considered to show the rapid increase and peak point of the rainfall hyetograph. The proposed triangular-shaped precipitation scheme is expected to be proportional to the temporal distribution of rainfall in arid and semi-arid regions, is a single-parameter model that can be estimated by keeping the first moment of the rainfall event. The total rainfall depth is determined by the area under the hyetograph. This approach, based on statistical analysis for parameter estimation, can reduce the smoothing effect of averaging. In addition, a design precipitation described by one or two parameters can be easily applied on a regional basis. In Figures 10, 11 and 12, the hyetographs related to the 2-hour plan barrage with the return period of 2, 10, 25 and 50 years during the base period (1993-2017) and the near future prediction period (2011-2030) under The climatic scenarios of 2.6, 4.5 and 8.5 have been drawn using two triangular methods (Yen and Chau) and periodic block. The value of the maximum rainfall intensities in the periodic block method for the base time and the forecast period in the return period of 2 years under the scenarios of 2.6, 4.5 and 8.5 respectively is on the cloud with: (1.97, 1.79) , 2.09 and 1.96) which with an increase of 1.5 times in the return period of 50 years are respectively equal to: (5, 4.55, 5.30 and 4.98) and also in the triangular method (Yen and Chau) the values The maximum rainfall intensities for the base time and the forecast period in the return period of 2 years under scenarios 2.6, 4.5 and 8.5 are respectively equal to: (0.94, 0.86, 0.1 and 0.94) With an increase of 1.5% in the return period of 50 years, it is equal to: (2.39, 2.17, 2.53 and 2.38) mm/min, respectively.

Conclusions

In the triangular method, the changes in the amount of precipitation are linear and gradual in such a way that the slope of the ascending part of the hyetograph is greater than the slope of the descending part. However, in the periodic block method, the changes in the amount of precipitation are irregular and non-linear, so that there will be a sudden increase or decrease. Therefore, the floods and hydrographs estimated by each of these two methods will change according to the pattern of each of the mentioned methods.

Author Contributions

All authors have the same contributions in Conceptualization; methodology; software; validation; formal analysis; investigation; resources, data curation; writing; original draft preparation; writing—review and editing; and visualization. The corresponding for supervision.; project administration, and funding acquisition was Reza Ghazavi

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

“Not applicable”

Acknowledgements

The authors would like to thank University of Kashan for participant in the present study.

Ethical considerations

The authors avoided from data fabrication and falsification.

Funding

The study was funded by the University of Khashan. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



انتخاب روش مناسب استخراج هایتوگراف بارش در مناطق خشک با تحلیل بارش‌های ساعتی و تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی

زهرا فرهنگیان^۱ | رضا قضاوی^۲✉

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: zahra.frahnakiann@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: ghazavi@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	موضوع: منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی (IDF) و هایتوگراف بارش نقش اساسی در طراحی ابعاد و اجزای سازه‌های آبخیزداری و ابعاد شبکه‌های زهکشی دارند و همهٔ سازه‌های هیدرولیکی براساس شدت بارش‌هایی با دورهٔ بازگشت و زمان تداوم مشخص طراحی می‌شوند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲	هدف: در این تحقیق از روش‌های مثلثی (ین و چاو) و بلوک تناوبی برای محاسبه و ترسیم هایتوگراف بارش در ایستگاه سینوپتیک کاشان به‌عنوان یک ایستگاه شاخص مناطق خشک استفاده شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸	روش تحقیق: به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش منطقهٔ مورد مطالعه، از مدل گردش عمومی جو و سناریوهای مختلف اقلیمی استفاده شد. سپس منحنی‌های شدت مدت فراوانی برای دورهٔ پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷) و دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) و آیندهٔ دور (۲۰۳۱-۲۰۵۰) با استفاده از روابط قهرمان و آبخضر ترسیم گردید.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۶	در ادامه، منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی استحصال و هایتوگراف بارش متناسب با آن براساس روش‌های مثلثی (ین و چاو) و بلوک تناوبی ترسیم شدند و نتایج حاصل با الگوهای بارش اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه سینوپتیک کاشان مقایسه شد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱	یافته‌ها: نتایج بررسی مقادیر بارش اندازه‌گیری‌شده در سال‌های اخیر نشان داد که حداکثر مقدار بارندگی در زمان ۳۰ دقیقه پس از شروع بارش رخ داده است. نتایج این مطالعه نشان داد که هایتوگراف بارش رسم‌شده با استفاده از داده‌های بارش اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده مشابه با هایتوگراف ترسیمی حاصل از روش مثلثی (ین و چاو) است.
کلیدواژه‌ها: رنگبار طرح، الگوی توزیع زمانی بارش، روش ین و چاو، روش بلوک تناوبی، سناریوهای اقلیمی.	نتیجه‌گیری: براساس نتایج می‌توان روش مثلثی (ین و چاو) را به‌عنوان روش مناسب بررسی توزیع بارش در ایستگاه‌های هواشناسی مناطق خشک معرفی کرد.

استناد: فرهنگیان، زهرا؛ و قضاوی، رضا. انتخاب روش مناسب استخراج هایتوگراف بارش در مناطق خشک با تحلیل بارش‌های ساعتی و تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی.

اکوهیدرولوژی، ۱۱(۳)، ۳۵۵-۳۷۳.

<http://doi.org/10.22059/ije.2024.383818.1844>



مقدمه

منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) و بارش‌های طراحی، از جمله شاخصه‌هایی است که به‌طور گسترده در پروژه‌های مدیریت منابع آب و طراحی سیستم‌های زهکشی (DS) در سطح حوزه‌های آبخیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (یوسفی، قضاوی و ساداتی‌نژاد، ۱۳۹۹). باران طرح خود مبنای طراحی سیلاب طراحی خواهد بود (بنی‌اسد، علیخانی و تقوایی، ۱۳۹۹). هیستوگرام یا الگوی زمانی توزیع بارش نشان‌دهنده برخی از خصوصیات کمی یک بارش مانند مقدار حداکثر یا اوج شدت بارش و موقعیت زمانی وقوع آن، مدت کل بارش، نقطه مرکزی بارش و الگوی زمانی است (قبادی، خدانشناس و مساعدی، ۱۳۹۸). اصولاً بارش طرح مطابق با یک سطح احتمال معین یا دوره بازگشت مشخص (T سال) در نظر گرفته می‌شود و هایتوگراف طراحی نیز برای این بارش ترسیم می‌شود و توزیع زمانی بارش طرح را نشان می‌دهد (وانگ، زانگ و سو، ۲۰۱۷). بارش طرح و هیدروگراف متناظر با آن با یک دوره بازگشت مشترک ترسیم می‌شوند و طراحی‌های هیدرولیکی (ابعاد کانال‌ها، ابعاد سرریزها و...) نیز بر مبنای خصوصیات هیدروگراف طرح انجام می‌شود (خاک‌سفیدی، نورا و نجفی‌نژاد، ۱۳۸۹). اگرچه واکنش هیدرولوژیکی ناشی از یک بارش معین، وابسته به بارندگی و وضعیت قبلی حوضه دارد، از طرفی جدا از پیچیدگی‌های ذاتی بارندگی، مکانیسم‌های تولید رواناب نیز اساساً بسیار پیچیده، غیرخطی و چندمتغیره هستند و بر این اساس در بسیاری از موارد، استفاده از یک بارش طراحی واحد نیز به‌عنوان ورودی اقلیمی منحصربه‌فرد برای یک سیستم هیدرولوژیکی، چندان واقعی نخواهد بود و نیاز است از سوابق تاریخی موجود در هر منطقه و رویدادهای شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل‌ها نیز، برای به دست آوردن بارش و هیدروگراف طرح استفاده کرد (کریمی، سلیمانی و نژادروشن، ۱۳۹۹). با وجود این، استفاده از بارش طرح به‌عنوان یک ابزار مهندسی کارآمد در مطالعات هیدرولوژی به‌دلیل مزایای ذاتی آن بسیار محبوب است؛ زیرا اولاً سطح یکنواختی را در مورد استانداردهای کیفیت و عملکرد سیستم زهکشی در حوضه‌های مختلف تبیین می‌کند، ثانیاً در مقایسه با روش‌هایی که از سوابق بارندگی تاریخی یا مدل‌های بارش تصادفی استفاده می‌کنند، محاسبات هیدرولوژیکی-هیدرولیکی و در نتیجه هزینه‌ها را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و در نهایت، از آنجاکه کمبود داده‌ها بزرگ‌ترین مشکل طراحی در سطح حوزه‌های آبخیز است، رویکرد استفاده از بارش طرح کارآمدترین راه برای تعدیل مشکل طراحی است (دوکا، لاسکو و ویرا، ۲۰۱۸؛ الوز، آبی‌دا و سفی، ۲۰۰۹).

پیشینه پژوهش

بر اساس بررسی منابع انجام‌شده، از دهه ۱۹۷۰ تاکنون در مطالعات انجام‌شده تعداد قابل توجهی از روش‌ها برای به دست آوردن بارش طرح پیشنهاد شده‌اند که به‌طور عمده می‌توان آن‌ها را در دو گروه اصلی قرار داد. دسته اول آن‌هایی است که مستقیماً از منحنی‌های IDF استنباط می‌شوند و دسته دوم آن‌هایی است که الگوی زمانی آن‌ها علاوه بر اطلاعات ارائه‌شده توسط منحنی‌های IDF (شدت-مدت-فراوانی) از معیارهای دیگری نیز تبعیت می‌کنند. در گروه اول، روش شیکاگو و انواع آن، مانند روش بلوک متناوب مناسب‌ترین‌ها هستند (ته‌چاو، مایدمنت و مایز، ۱۹۸۸). برای تعریف این نوع روش‌های طراحی، از تمام نقاط متناظر منحنی IDF مرتبط به یک دوره بازگشت معین استفاده می‌شود (بین و تی‌چاو، ۱۹۸۰).

سایر روش‌های مبتنی بر منحنی IDF فقط با استفاده مستقیم یک نقطه مطابق با منحنی شدت-مدت معین انجام می‌شود و سپس اشکال هندسی یا الگوهای زمانی مختلفی در نظر گرفته می‌شود. روش منطقی کلاسیک، روش مثلثی (بین و تی‌چاو، ۱۹۸۰)، روش سیفالدا (سیفالدا، ۱۹۷۳) و روش مثلث دوگانه (بلانشت، مولینه و تواتی، ۲۰۱۸) و بارش خطی/نمایی از جمله روش‌های دیگری است که برای به دست آوردن هایتوگراف بارش استفاده می‌شوند. روش مستطیلی دقیقاً کل بارندگی انباشته‌شده از منحنی IDF را برای مدت‌زمان از پیش انتخاب‌شده بازتولید می‌کند. در این روش، شدت بارندگی در طول مدت هایتوگراف طراحی ثابت فرض می‌شود. روش پیشنهادی سیفالدا کل بارندگی تجمعی ذکر شده را به سه بلوک فرعی تقسیم می‌کند: بلوک اول همراه با افزایش شدت بارندگی، بلوک دومی و مرکزی که حداکثر شدت برای آن اتفاق می‌افتد و بلوک سوم با مدت‌زمان بیشتر که شامل کاهش شدت بارندگی است. روش مثلثی ساده‌تر است و به‌گونه‌ای طراحی شده که حداکثر شدت (یعنی رأس بالایی مثلث) دقیقاً دو برابر شدت متوسط است (مستقیماً از منحنی IDF برای مدت‌زمان معین به دست می‌آید). فرمول‌سازی بارش خطی/نمایی برای اولین بار

توسط وات، چاو، هاگ و لاتم، پس از تجزیه و تحلیل جامع از بارندگی‌های بیشینه در کانادا پیشنهاد شد (کوت سویانس، کوزینس و ماناس، ۱۹۹۸). این رویکرد از دو روند تحلیلی (برای مثال، خطی و نمایی) برای نشان دادن دو مرحله از فرایند شدت بارندگی استفاده می‌کند: یکی قبل از اوج بارندگی و دیگری بعد از اوج بارندگی. الگوی بارش مستخرج از روش مثلث دوگانه شامل یک مثلث مرکزی است که روی یک مثلث اصلی دیگر هم‌پوشانی دارد، به‌گونه‌ای که بارش به‌دست‌آمده، شدت اوج بیشتری نسبت به دو بارش قبلی ارائه می‌دهد. در دسته دوم، تنوعی از روش‌های بررسی و تعیین بارش‌های طرح را می‌توان در تحقیقات پیدا کرد که همه آن‌ها براساس الگوهای زمانی مشاهده‌شده در سری‌های تاریخی فرمول‌بندی شده‌اند (چنگ و آقا، ۲۰۱۴؛ ترستریپ و التال، ۱۹۷۴؛ پیل‌گیرم و کوردی، ۱۹۷۶).

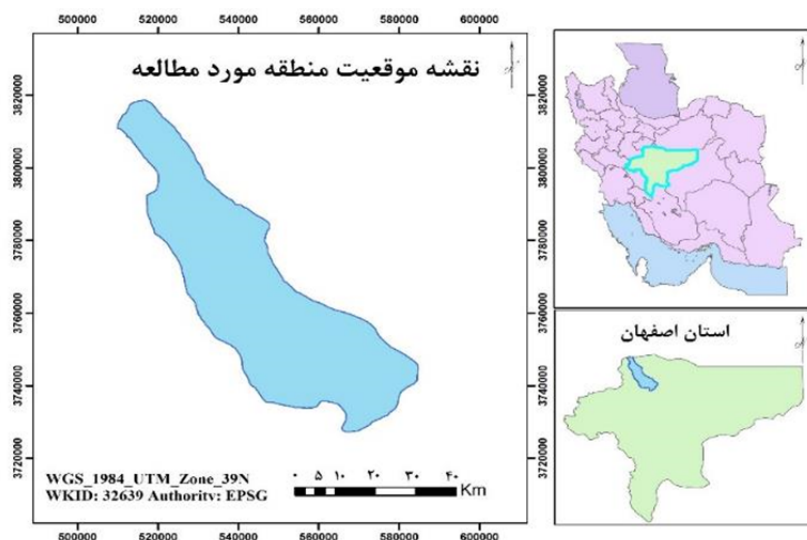
تغییر در میزان و توزیع بارندگی و سایر اشکال بارش یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده تأثیر کلی تغییرات آب‌وهواست (گونگ، لیانگ و لی، ۲۰۱۶). بارش یکی از عوامل مهمی است که از نظر میزان، شدت و توزیع زمانی به‌صورت قابل توجهی تحت تأثیر تغییر اقلیم است (صدریان، قربانی زاده و خرازی، ۱۳۹۰). تغییر اقلیم در منطقه‌های گوناگون به فرم‌های مختلف ظاهر شده است. برای مثال در برخی مناطق نوع ریزش (باران و برف)، برخی دیگر مقدار بارش و برخی شدت بارندگی تغییر کرده است. اگرچه روش‌های متعددی برای تعیین الگوی زمانی بارش پیشنهاد شده، در کمتر مطالعه‌ای به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوی توزیع بارش پرداخته است. سیل‌های ناگهانی عمدتاً ناشی از الگوی توزیع بارش هستند و بنابراین باید به تغییرات بارندگی و تأثیر تغییر اقلیم بر توزیع بارش توجه بیشتری شود (اوادالله، السعید و عبدلیکی، ۲۰۱۷؛ سه آ و فراگا، ۲۰۱۸؛ بن و تی چاو، ۱۹۸۰؛ نورا، خاک‌سفیدی و رازی، ۱۳۸۷؛ شکوهی و حبیب‌نژاد، ۱۳۹۸).

هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر هایتوگراف بارش در مناطق خشک و معرفی بهترین مدل برآورد هایتوگراف بارش است. در این مطالعه، ضمن ترسیم منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی برای یک دوره پایه و براساس سناریوهای مختلف اقلیمی، بارش طرح از منحنی‌ها استخراج شده و هایتوگراف بارش برای دوره پایه و تحت سناریوهای مختلف اقلیمی ترسیم و مقایسه می‌شود.

مواد و روش‌ها

۱. منطقه مورد مطالعه

شهرستان کاشان با وسعت ۹۶۴۷ کیلومتر مربع در بخش شمالی استان اصفهان قرار گرفته و از شرق با شهرستان آران و بیدگل، از جنوب با شهرستان‌های نطنز و برخوار و میمه از غرب و شمال به ترتیب با شهرستان‌های دلیجان (از استان مرکزی) و قم همسایه است (شکل ۱). براساس بررسی‌های آماری بلندمدت (۱۹۶۷-۲۰۲۰): میانگین سالانه بارش ۱۳۶/۵ میلی‌متر، میانگین حداقل



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و در استان اصفهان

رطوبت نسبی ۲۷ درصد، متوسط دمای منطقه مورد مطالعه ۱۹/۷ درجه سانتی‌گراد، میانگین دمای هوا در سردترین ماه سال در ماه ژانویه ۴/۸ درجه سانتی‌گراد و در گرم‌ترین ماه سال در ماه ژولای ۳۴ درجه سانتی‌گراد است. تعداد روزهای یخبندان آن به‌طور متوسط تقریباً ۴۲ روز در سال است. بر طبق منحنی آمبروترمیک، طول دوره خشکسالی در شهر کاشان از اول ماه می (یازدهم اردیبهشت) تا آخر ماه اکتبر (دهم آبان) است.

۲. روش پژوهش

در این مطالعه، ابتدا تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان و توزیع بارش در منطقه کاشان بررسی شد؛ سپس منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی منطقه برای دوره پایه و دوره‌های آتی ترسیم شد. برای رسم هایتوگراف بارش براساس روش بلوک تناوبی با استفاده از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، ابتدا عمق بارش در n بازه زمانی به مدت زمان Δt تعیین شد (کل بارش $\llbracket T \rrbracket$ است $d=n\Delta t$). سپس عمق بارش متناظر با شدت بارش استخراج گردید. با کم کردن مقادیر عمق بارش‌های متوالی از هم، میزان بارش برای هریک از واحدهای زمانی به دست آمد. درنهایت، هایتوگراف بارش برای دوره پایه و دوره‌های آینده، براساس منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی ترسیم و مقایسه شد.

۲-۱. تغییر اقلیم و داده‌های بارندگی

به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان بارش، از داده‌های دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷) براساس مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کاشان استفاده شد. سپس با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده به‌دست‌آمده از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG، تغییرات میزان بارش در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) و آینده دور (۲۰۳۱-۲۰۵۰) برآورد شد. در این مطالعه از سناریوهای جدید انتشار با نام‌های RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به‌عنوان سناریوهای خوش‌بینانه، بینابینی و بدبینانه استفاده شد.

۲-۲. منحنی‌های شدت مدت فراوانی

نسبت بین تغییرات ارتفاع بارش به تغییرات زمان را شدت بارش می‌گویند که در محاسبه ابعاد بسیاری از سازه‌ها مانند کانال‌های فاضلاب شهری، سرریز سدها، اقدامات آبخیزداری و مهندسی رودخانه نسبت بین طراحی ابعاد سازه‌ها و شدت سیلاب عبوری بسیار حائز اهمیت است (پیل‌گیرم و کوردی، ۱۹۷۶). در پژوهش حاضر با توجه به اینکه دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله در مدیریت‌های مربوط به اقدامات هیدرولیکی و آبخیزداری اهمیت بیشتری دارد، مقایسه منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) دوره‌های پیش‌بینی شده با دوره مشاهداتی در دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله انجام شده است. برای این منظور، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از روابط قهرمان و آبخضر برای دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله استخراج شد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$R_t^T = At^B [a_1 + a_2 \ln(T - a_3) R_{60}^{10}] \quad \text{رابطه ۱}$$

$$R_{60}^{10} = e^{-0/993} (R_{1440}^2)^{1/06} \quad \text{رابطه ۲}$$

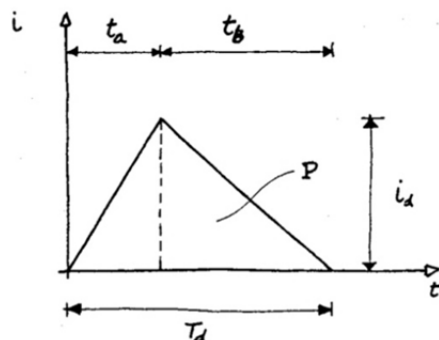
در روابط فوق، R_t^T ، شدت بارندگی در مدت و دوره بازگشت مورد نظر، R_{60}^{10} ، شدت بارش یک‌ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال، R_{1440}^2 ، میانگین بیشینه باران روزانه، t ، دوره زمانی مورد نظر، T ، دوره بازگشت و A ، B ، a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب ثابت معادله هستند.

۲-۳. بارش طرح و ترسیم هایتوگراف با استفاده از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی

در این مطالعه، از روش‌های مبتنی بر منحنی IDF شامل روش مثلثی، و روش بلوک تناوبی برای رسم هایتوگراف بارش استفاده شد. روش مثلثی (پن و چاو)، یک شکل مثلثی را برای نشان دادن افزایش سریع و نقطه اوج هایتوگراف بارندگی در نظر گرفته است. انتظار می‌رود که هایتوگراف مثلثی با توزیع زمانی بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطابقت بیشتری داشته باشد. این رویکرد مدلی تک‌پارامتری است که در آن می‌توان با حفظ لحظه اول، رویداد بارندگی را تخمین زد. دومین روش، روش بلوک تناوبی است که با استفاده از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، هایتوگراف بارش را به‌صورت هیستوگرام‌های مجزا تهیه می‌کند؛ به‌صورتی که حداکثر شدت بارندگی بین یک‌دوم و یک‌سوم طول زمان بارندگی و سایر شدت‌های بارندگی به‌صورت نزولی در قبل و بعد از حداکثر شدت بارندگی قرار می‌گیرد.

۲-۳-۱. روش مثلثی (ین و چاو)

این روش یک شکل مثلثی را برای نمایش افزایش سریع و نقطه اوج های توگراف بارش در نظر گرفته است. شکل (۲) نمایش شماتیک از یک های توگراف معمولی را نشان می‌دهد. شکل مثلثی های توگراف بر اساس ضریب پیشروی رگبار طرح ایجاد می‌شود و مقادیر پارامترهای مختلف های توگراف از روابط ۳ تا ۵ محاسبه می‌شود.



شکل ۲. شماتیک یک های توگراف مثلثی (ین و چاو) و پارامترهای مختلف آن

$$r = \frac{t_a}{T_d} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$i_d = \frac{2P}{T_d} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$t_b = T_d - t_a = (1-r) T_d \quad \text{رابطه ۵}$$

در روابط فوق، t مقدار ضریب پیشروی رگبار طرح، t_a زمان رسیدن تا نقطه اوج های توگراف، T_d مدت زمان کل بارش، i_d نقطه اوج شدت بارش، P مجموع بارش‌های ۱۰ دقیقه‌ای، t_b زمان شاخه نزولی بارش است.

۲-۳-۲. روش بلوک تناوبی

در این روش از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی منطقه مورد مطالعه برای تهیه های توگراف بارش با تداوم و دوره بازگشت معین استفاده می‌شود. نمودار تهیه شده در این روش به صورت هیستوگرام‌های مجزاست. برای ساخت هر های توگراف مربوط به بارش طرح، رگبارهای با تداوم کمتر و شدت بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعد از به دست آوردن شدت‌های بارندگی مربوط به دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ در زمان مورد نظر، با کم کردن مقادیر بارش متوالی از هم، میزان بارش برای هر کدام از واحدهای زمانی به دست می‌آید. سپس مقدار حداکثر بارش بین یک‌سوم و یک‌دوم طول زمانی بارندگی قرار گرفته و مقادیر بارندگی مربوط به بازه‌های زمانی مختلف به صورت نزولی در سمت راست و چپ بلوک مرکزی قرار می‌گیرد و در نتیجه، های توگراف بارش طرح به دست می‌آید. در نهایت با استفاده داده‌های دوره آماری منحنی‌های IDF استخراج و رسم و سپس با استفاده از روش مثلثی و بلوک تناوبی های توگراف بارش رسم شد که نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

نتایج و بحث

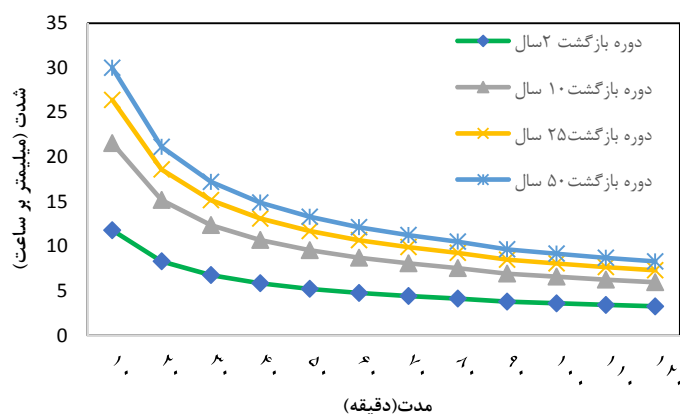
۱. تأثیر تغییر اقلیم بر میزان و توزیع بارش

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که شدت بارش و میزان بارش در دوره بازگشت‌های مختلف ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال تحت سناریو ۲/۶ به میزان ۸/۹۸ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. تحت سناریو ۴/۵ به میزان ۶/۱۰ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و تحت سناریو ۸/۵ بسیار نزدیک به دوره پایه برآورد شده است، به طوری که به میزان ۰/۳۷ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. با توجه به افزایش دما و گرمایش جهانی ناشی از تغییر اقلیم و از سوی دیگر افزایش تبخیر و تعرق و یکنواخت نبودن

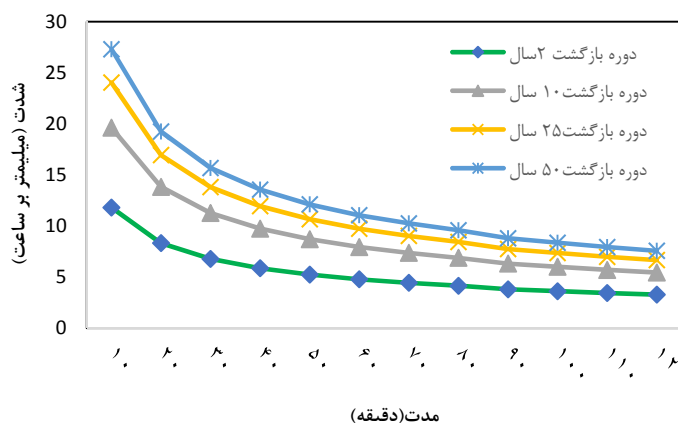
توزیع بارش در سال‌های آینده، بیشتر بارش‌ها به صورت مایع خواهد بود و به طبع آن تأثیرات زیادی بر منابع آبی، کشاورزی و محیط‌زیست این شهرستان دارد. این نتایج با نتایج افشارنیا و همکاران که نشان داده‌اند که در همه ایستگاه‌های منطقه کاشان بارش در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه دارای روند کاهشی و دمای متوسط نیز در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد بود، همخوانی دارد (افشارنیا، پناهی و احترام، ۱۳۹۵).

۲. به دست آوردن منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی

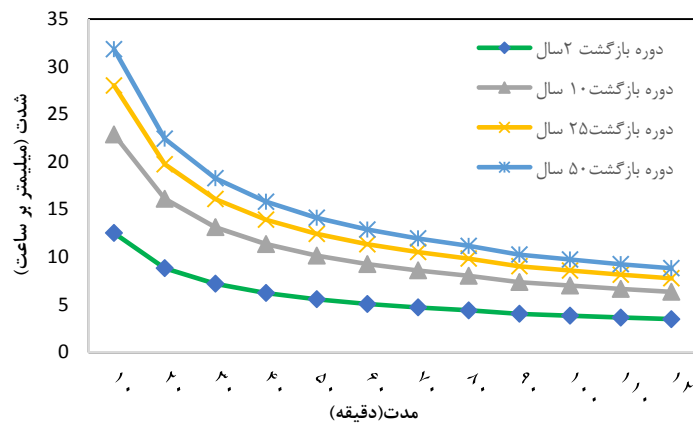
پس از برآورد میزان بارش تحت سناریوهای مختلف اقلیمی، منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی برای دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷)، آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) و آینده دور (۲۰۳۱-۲۰۵۰)، تحت سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ برای دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله ترسیم شد (شکل‌های ۳ تا ۶).



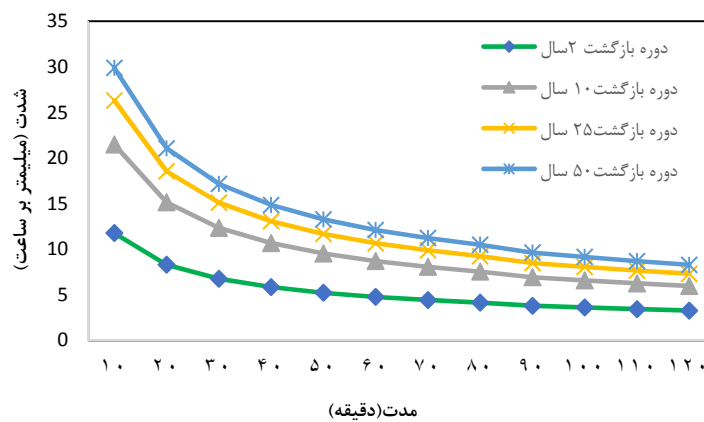
شکل ۳. منحنی شدت مدت فراوانی در زمان پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷)



شکل ۴. منحنی شدت مدت فراوانی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریو ۲/۶



شکل ۵. منحنی شدت مدت فراوانی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریو ۴/۵



شکل ۶. منحنی شدت مدت فراوانی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریو ۸/۵

منحنی‌های IDF معمولاً کاهش تصاعدی شدت بارندگی را برحسب مدت‌زمان بارش نشان می‌دهند و به‌طور معمول بارش‌ها با مدت‌زمان کوتاه‌تر برای یک دوره بازگشت معین شدت بیشتری دارند. براساس نتایج حاصل از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، متوسط شدت بارندگی برای رگبار طرح دوساعته با دوره بازگشت ۲ ساله در دوره پایه برابر است با ۵/۴۶ و برای دوره بازگشت ۵۰ ساله برابر است با ۱۳/۸۶ میلی‌متر بر ساعت که نشان می‌دهد افزایشی ۱/۵ درصدی داشته است. همچنین طبق سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ در دوره پیش‌بینی آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) روندی افزایشی برابر با ۱/۵ درصد برای بارش‌های دوساعته طبق همه سناریوها داشته است. شکوهی و حبیب‌نژاد نیز براساس نتایج حاصل از تحلیل شدت-مدت-فراوانی بارش‌های کوتاه‌مدت ایستگاه مهرآباد تهران و بررسی IDF های تولیدشده از بارش‌های حدی نشان دادند که در آینده دور یعنی دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰ مقدار و شدت بارش به‌میزان قابل توجهی در یک دوره بازگشت معین افزایش می‌یابد. همچنین فراوانی و احتمال وقوع بارش‌های حدی با افزایش قابل توجهی همراه خواهد بود. نتایج حاصل از تحلیل شدت-مدت-فراوانی بارش‌های کوتاه‌مدت و بررسی IDF های تولیدشده از بارش‌های حدی نشان داد که در آینده دور یعنی دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰ مقدار و شدت بارش به‌میزان قابل توجهی در یک دوره بازگشت معین افزایش می‌یابد. همچنین فراوانی و احتمال وقوع بارش‌های حدی با افزایش قابل توجهی همراه خواهد بود (شکوهی و حبیب‌نژاد، ۱۳۹۸).

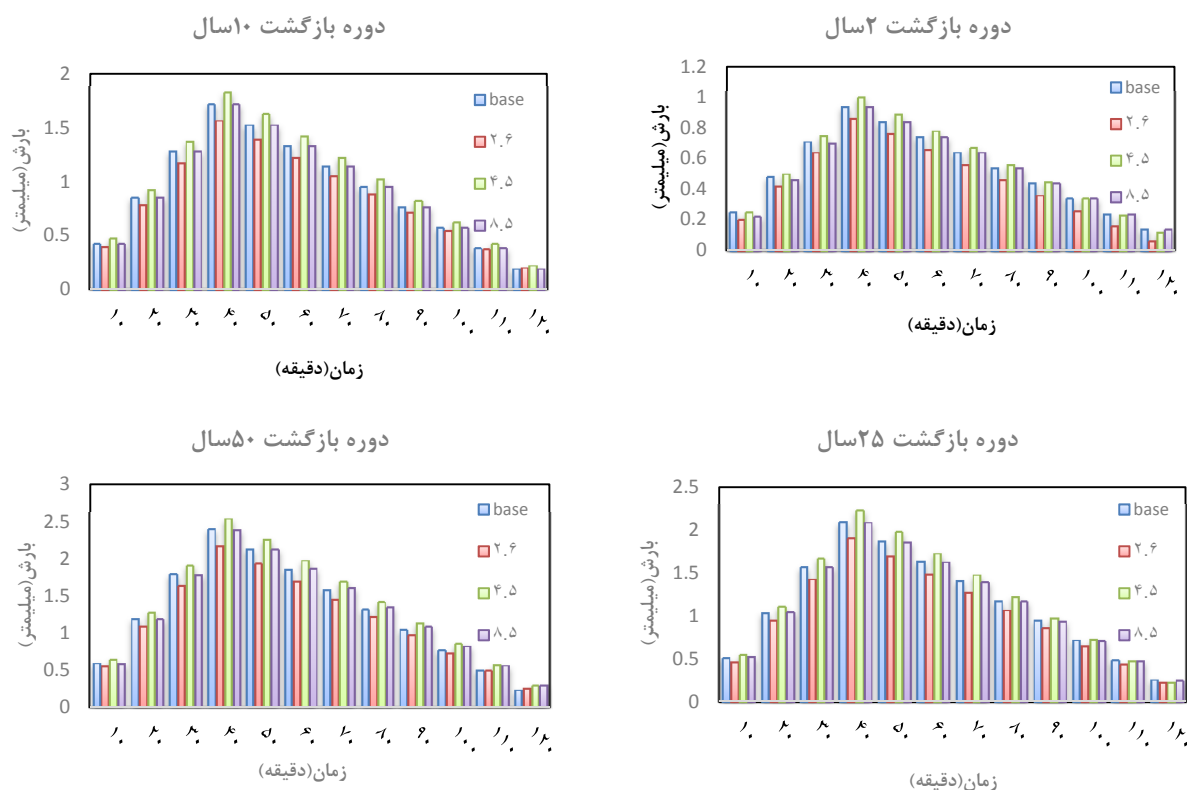
۳. رسم هایتوگراف بارش

پس از رسم منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی و به دست آوردن بارش‌های دوساعته (جدول ۱)، برای مشخص نمودن الگوی توزیع زمانی بارش به روش ین و چاو (مثلی) ابتدا نسبت $\frac{t_a}{T_d}$ برای تمام رگبارها برابر ۰/۳۴۵ در نظر گرفته شد. بر این اساس و طبق رابطه

۳، برای رگبار طرح دوساعته میزان ta یا زمان رسیدن به نقطه اوج هیتوگراف برابر $۰/۶۹$ ساعت یا تقریباً ۴۰ دقیقه به دست آمد. مقدار id یا زمان نقطه اوج شدت بارش از (رابطه ۴) برابر $۴۱/۴$ دقیقه پس از شروع بارش به دست آمد. مقدار t_B (شاخه نزولی بارش) طبق رابطه ۵ برابر $۷۸/۶$ است. سپس به دلیل فرض برخی بودن تغییرات میزان بارش نسبت به زمان، شدت بارش مربوط به زمان‌های دیگر با استفاده از روش میان‌یابی به دست آمد. شکل ۷، هیتوگراف بارش مثلی مربوط به یک بارش ۱۲۰ دقیقه‌ای برای دوره بازگشت‌های مختلف و تحت سناریوهای مختلف اقلیمی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقایسه توزیع بارش با الگوی مثلی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال طی دوره پایه و آینده نزدیک

2030-2011																
زمان (دقیقه)	دوره بازگشت ۲ سال				دوره بازگشت ۱۰ سال				دوره بازگشت ۲۵ سال				دوره بازگشت ۵۰ سال			
	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵
10	0.25	0.20	0.25	0.22	0.42	0.39	0.47	0.42	0.51	0.47	0.42	0.51	0.59	0.55	0.64	0.58
20	0.48	0.42	0.50	0.46	0.85	0.78	0.92	0.85	1.04	0.92	0.85	1.04	1.19	1.11	1.27	1.18
30	0.71	0.64	0.75	0.70	1.28	1.17	1.37	1.28	1.57	1.37	1.17	1.57	1.79	1.67	1.90	1.78
40	0.94	0.86	1.00	0.94	1.71	1.56	1.82	1.71	2.1	1.82	1.56	2.1	2.39	2.23	2.53	2.38
50	0.84	0.76	0.89	0.84	1.52	1.39	1.62	1.52	1.87	1.62	1.39	1.87	2.12	1.98	2.25	2.12
60	0.74	0.66	0.78	0.74	1.33	1.22	1.42	1.33	1.64	1.42	1.22	1.64	1.85	1.73	1.97	1.86
70	0.64	0.56	0.67	0.64	1.14	1.05	1.22	1.14	1.41	1.22	1.05	1.41	1.58	1.48	1.69	1.60
80	0.54	0.46	0.56	0.54	0.95	0.88	1.02	0.95	1.18	1.02	0.88	1.18	1.31	1.23	1.41	1.34
90	0.44	0.36	0.45	0.44	0.76	0.71	0.82	0.76	0.95	0.82	0.71	0.95	1.04	0.98	1.13	1.08
100	0.34	0.26	0.34	0.34	0.57	0.54	0.62	0.57	0.72	0.62	0.54	0.72	0.77	0.73	0.85	0.82
110	0.24	0.16	0.23	0.24	0.38	0.37	0.42	0.38	0.49	0.42	0.37	0.49	0.5	0.48	0.57	0.56
120	0.14	0.06	0.12	0.14	0.19	0.2	0.22	0.19	0.26	0.22	0.2	0.26	0.23	0.23	0.29	0.30



شکل ۷. مقایسه هیتوگراف دوساعته بارش با روش مثلی (بن و چاو) با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله تحت سه سناریو اقلیمی طی دوره پایه و آینده نزدیک

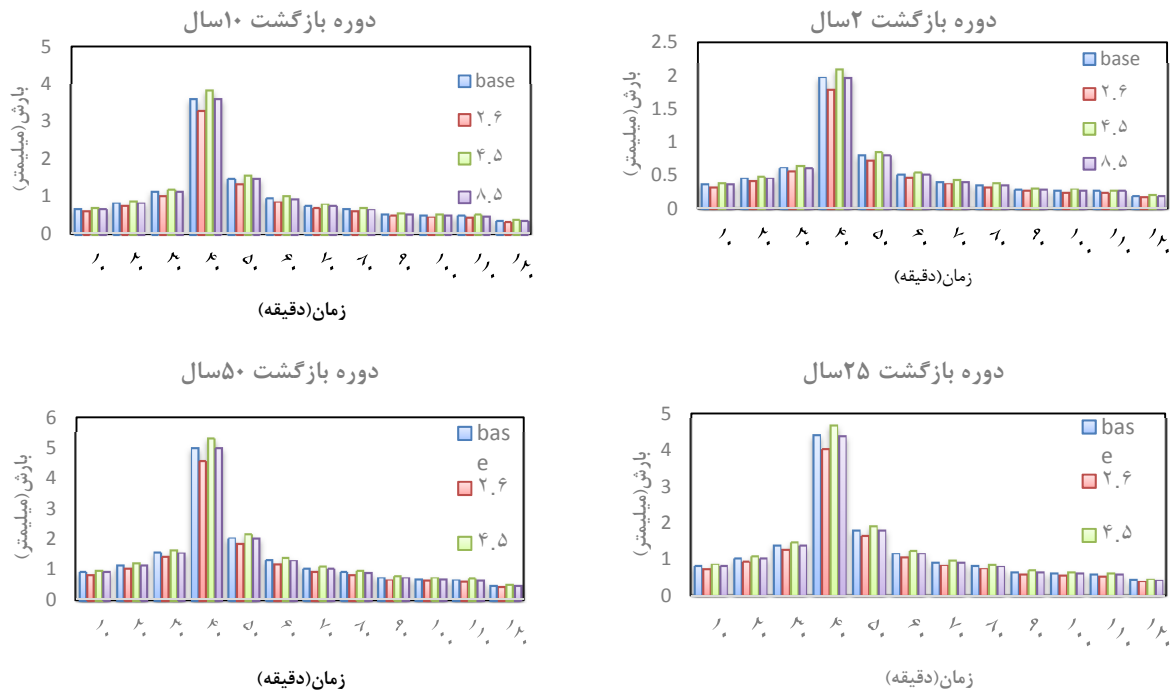
نتایج حاصل از رسم هایتوگراف بارش با روش ین و چاو برای دوره پایه و دوره‌های پیش‌بینی نشان داد که مقادیر بارش در طی دوره بازگشت‌های مختلف روندی افزایشی و کاهشی دارد، به طوری که میزان حداکثر بارش در دوره پایه در دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال به ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۱/۷۱، ۲/۱ و ۲/۳۹ است که این مقادیر بسیار نزدیک به سناریو بدبینانه ۸/۵ است، یعنی به ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۱/۷۱، ۲/۰۹ و ۲/۳۸ و طبق سناریو خوش‌بینانه ۲/۶ مقادیر نسبت به دوره پایه به اندازه ۸ درصد کاهش پیدا خواهد کرد که به ترتیب برابر با ۱، ۱/۸۲، ۲/۲۳ و ۲/۵۳ است. اما طبق سناریو بینابینی ۴/۵ مقادیر حداکثر میزان بارش نسبت به دوره پایه به اندازه ۶ درصد افزایش، به ترتیب برابر با ۰/۸۶، ۱/۷۱، ۲/۱ و ۲/۳۹ است. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر محاسبه شده تحت سناریو ۴/۵ نسبت به سناریو ۲/۶، ۱۶/۲۷ درصد افزایش داشته است. مقادیر محاسبه شده تحت سناریو ۸/۵ به اندازه ۹/۳۰ درصد نسبت به سناریو ۲/۶ افزایش یافته و مقادیر محاسبه شده تحت سناریو ۸/۵ به میزان ۶ درصد نسبت به سناریو ۴/۵ کاهش یافته است.

برای رسم هایتوگراف به روش بلوک تناوبی، بارش طرح دوساعته با دوره بازگشت‌های مختلف برای دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷) و آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی از منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی به دست آمد (جدول ۲). سپس مقادیر بارندگی مربوط به بازه‌های زمانی ۱۰ دقیقه‌ای برای پایه زمانی ۱۰ تا ۱۲۰ دقیقه به دست آمده برای رسم هایتوگراف بارش، یک بار حداکثر مقدار بارندگی در نقطه اوج شدت بارش در زمان (۴۰ دقیقه) و بار دیگر در وسط (۶۰ دقیقه) قرار داده شد و توزیع سایر مقادیر بارش ۱۰ دقیقه‌ای به ترتیب در بالا و پایین مقدار حداکثر قرار گرفت، سپس اقدام به رسم هایتوگراف‌های مجزا شد (شکل ۸ و ۹).

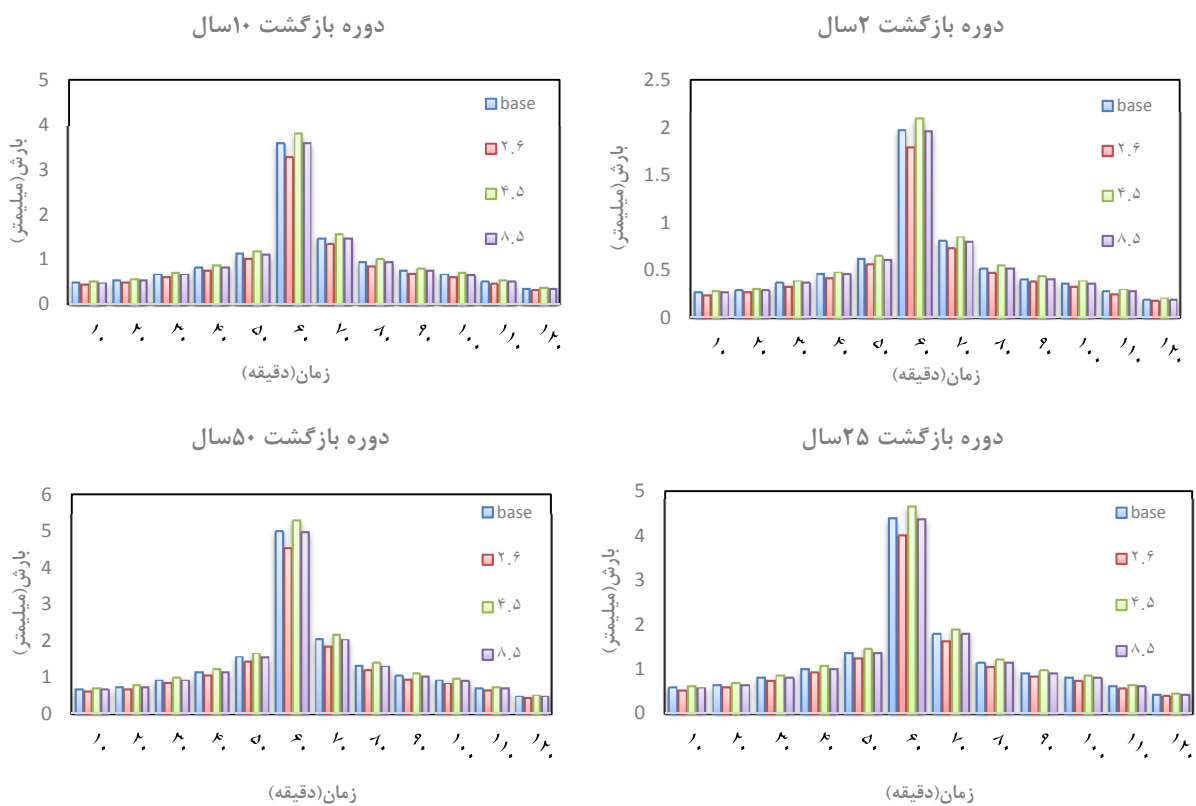
طبق نتایج حاصل از شدت بارش‌ها در دوره‌های بازگشت مختلف (۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله و در مقیاس‌های زمانی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ دقیقه) در آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) و مقایسه آن با دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷) مشخص شد که تحت سناریو خوش‌بینانه RCP2.6 کمترین میزان افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی را دارد و شدت بارندگی نسبت به دوره پایه کاهش پیدا خواهد کرد. طبق سناریو بینابینی RCP4.5 بیشترین میزان افزایش شدت بارندگی نسبت به دوره پایه دیده می‌شود و همچنین طبق سناریو بدبینانه RCP8.5 بیشترین تشابه میان شدت بارندگی با دوره پایه دیده شد. براساس نتایج مطالعات یوسفی و همکاران، شدت بارندگی در حوضه تهران کرج به ترتیب در سناریوهای ۶/۲، ۴/۵ و ۸/۵ در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و سناریوهای ۴/۵، ۸/۵ و ۲/۶ در دوره آماری ۲۰۵۱-۲۰۸۰ با شیب ملایمی افزایش خواهد یافت (یوسفی، قضاوی و ساداتی‌نژاد، ۱۳۹۹).

جدول ۲. مقایسه توزیع بارش با الگوی بلوک تناوبی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ سال طی دوره پایه و آینده نزدیک

۲۰۳۰-۲۰۱۱																
زمان (دقیقه)	دوره بازگشت ۲ سال				دوره بازگشت ۲۵ سال				دوره بازگشت ۱۰ سال				دوره بازگشت ۵۰ سال			
	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵	پایه	۲.۶	۴.۵	۸.۵
10	0.37	0.33	0.39	0.37	0.82	0.74	0.87	0.82	0.67	0.71	0.61	0.67	0.93	0.85	0.99	0.93
20	0.46	0.42	0.48	0.46	1.02	0.93	1.08	1.02	0.83	0.88	0.76	0.83	1.16	1.06	1.23	1.16
30	0.62	0.56	0.65	0.61	1.37	1.26	1.46	1.37	1.12	1.19	1.02	1.13	1.57	1.43	1.66	1.56
40	1.97	1.79	2.09	1.96	4.38	4.01	4.67	4.4	3.58	3.81	3.27	3.59	5	4.55	5.30	4.98
50	0.81	0.73	0.85	0.80	1.8	1.64	1.91	1.8	1.47	1.56	1.34	1.47	2.05	1.86	2.17	2.04
60	0.52	0.47	0.55	0.52	1.16	1.06	1.23	1.16	0.94	1.01	0.86	0.95	1.32	1.20	1.40	1.31
70	0.41	0.38	0.44	0.41	0.92	0.84	0.98	0.92	0.75	0.80	0.69	0.75	1.05	0.95	1.11	1.04
80	0.36	0.33	0.39	0.36	0.81	0.75	0.86	0.82	0.66	0.71	0.61	0.67	0.93	0.84	0.98	0.92
90	0.29	0.27	0.31	0.29	0.66	0.6	0.7	0.66	0.54	0.57	0.49	0.54	0.75	0.68	0.79	0.75
100	0.28	0.25	0.30	0.28	0.62	0.57	0.66	0.63	0.51	0.54	0.46	0.51	0.71	0.65	0.75	0.71
110	0.27	0.24	0.28	0.27	0.59	0.54	0.63	0.6	0.48	0.52	0.44	0.49	0.68	0.62	0.72	0.67
120	0.19	0.18	0.21	0.19	0.43	0.4	0.46	0.44	0.35	0.38	0.32	0.36	0.49	0.45	0.52	0.49



شکل ۸. مقایسه هایتوگراف دوساعته روش بلوک تناوبی با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله تحت سه سناریو اقلیمی و ضریب پیشروی رگبار ۳۴۵/۰



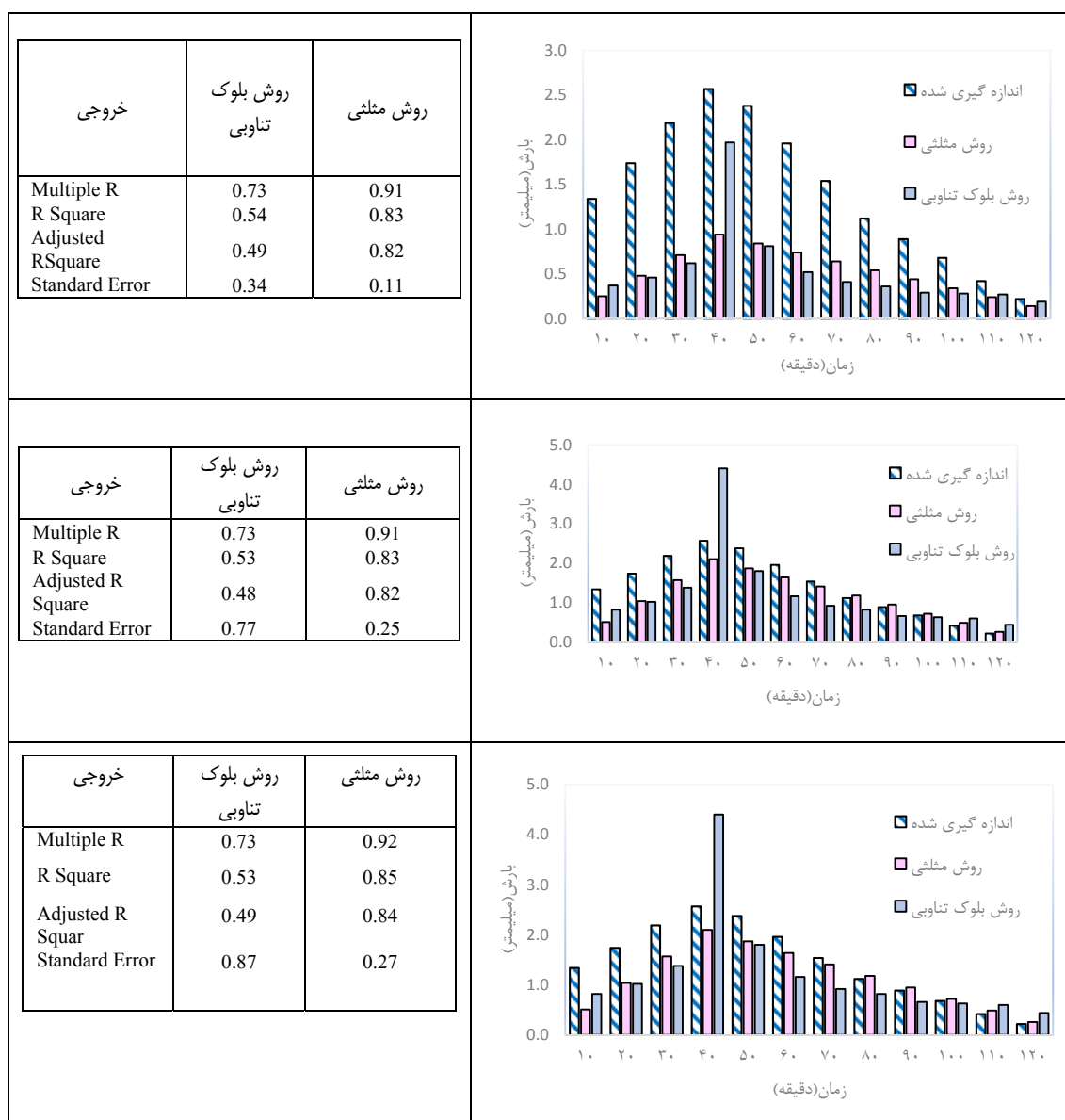
شکل ۹. مقایسه هایتوگراف دوساعته روش بلوک تناوبی با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله تحت سه سناریو اقلیمی و ضریب پیشروی رگبار ۵/۰

۴. مقایسه هایتوگراف بارش بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده و روش‌های مثلثی و بلوک تناوبی در سال‌های اخیر

برای مقایسه هایتوگراف بارش بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده و رسم شده با استفاده از روش‌های مثلثی و بلوک تناوبی، ابتدا داده‌های مقدار بارش از ایستگاه سینوپتیک کاشان طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۲۲ دریافت شد؛ سپس ۲۹ واقعه بارش دوساعته از آن استخراج شد در بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای از مقدار بارش‌ها میانگین گرفته شد. نتایج داده‌های آماری مقدار بارش در سال‌های اخیر نشان داد که در زمان ۳۰ دقیقه پس از شروع بارش حداکثر مقدار بارندگی رخ داده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که هایتوگراف بارش با استفاده از داده‌های آماری بسیار شبیه به روش مثلثی به دست آمد (شکل ۱۰). همچنین مقدار بارش در سال‌های اخیر با مقدار بارش حاصل از دو روش بلوک تناوبی و مثلثی طی دوره بازگشت‌های ۲، ۲۵ و ۵۰ سال مقایسه شد و به‌طور کلی مقدار R^2 حاصل از روش مثلثی نزدیک به عدد ۱ در طی دوره بازگشت‌های ۲، ۲۵ و ۵۰ سال به دست آمد که نشان‌دهنده این است که مقادیر بارش اندازه‌گیری شده در سال‌های اخیر بسیار نزدیک به روش مثلثی است، به‌طوری‌که مقدار R^2 در دوره بازگشت‌های ۲، ۲۵ و ۵۰ سال به ترتیب برابر با ۰/۸۳، ۰/۸۳ و ۰/۸۵ برآورد شده است (شکل ۱۰). همچنین این مقادیر بیانگر این است که داده‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های اخیر بسیار نزدیک به دوره بازگشت ۵۰ سال در روش مثلثی است.

جدول ۳. واقعه‌های بارش دوساعته اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک کاشان (۲۰۱۹-۲۰۲۲)

زمان واقعه بارش	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0	0.2
2	0	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0	0.4	0.2	0
4	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2
5	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0	0	0.2	0	0.2	0.4
6	0.4	0.2	0.2	0	0.2	0.4	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4	0.2
7	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0	0.2
8	0.2	0.2	0	0.2	0	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0	0.2
9	0.2	0.2	0.4	0	0.2	0	0.2	0.2	0	0.4	0.4	0.2
10	0.2	0.4	0.6	0.8	1.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2
11	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
12	0.2	0.2	0.4	0.4	0.2	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2
13	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0.2	0	0.4	0.2
14	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0.2	0.2	0.2
15	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0	0.2
16	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	0.4	0.2
17	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.2
18	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.6	0.2	0.4	0.4
19	0	0.2	0.4	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.4	0.2
20	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2
21	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0	0	0.2	0	0.4	0.4
22	0.2	0.4	0	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0
23	0	0	0	0.2	0	0.2	0.6	1	0.6	0.2	0	0
24	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0	0.2	0	0.2
25	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2
26	0.4	0.2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0.2	0	0.2
27	0.6	0.2	0.6	0.6	0.4	0.4	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
28	0	0.2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4
29	0.2	0	0	0	0.2	0.2	0	0	0.2	0	0.2	0
میانگین	0.193	0.186	0.234	0.221	0.2	0.193	0.228	0.228	0.214	0.255	0.2	0.221



شکل ۱۰. مقایسه توزیع بارش اندازه‌گیری شده در سال‌های اخیر با مقادیر برآوردی از روش‌های مثلثی و بلوک تناوبی در دوره بازگشت‌های ۲ (بالا)، ۲۵ (وسط) و ۵۰ سال (پایین)

با توجه به روابط بارش- رواناب و اثر شدت بارندگی بر روی سیل‌های ناگهانی، بررسی های توگراف‌های بارش لازم است. های توگراف بارش، گرافی است که تغییرات بارش نسبت به زمان را نشان می‌دهد. در این مطالعه، های توگراف مثلثی به‌عنوان روش مناسب برای نشان توزیع بارندگی در منطقه مورد مطالعه معرفی شده است. در این روش، عمق کل بارندگی توسط ناحیه زیر های توگراف مشخص می‌شود. استفاده از این رویکرد براساس تحلیل‌های آماری برای تخمین پارامتر، می‌تواند اثر هموارسازی میانگین‌گیری را کاهش دهد. علاوه بر این، یک بارش طراحی که با یک یا دو پارامتر توصیف می‌شود، می‌تواند به راحتی براساس منطقه‌ای اعمال شود. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ های توگراف‌های مربوط به رگبار طرح دوساعته با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله طی دوره پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۷) و دوره پیش‌بینی آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۳۰) تحت سناریوهای اقلیمی ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ به دو روش مثلثی (ین و چاو) و بلوک تناوبی رسم شده است. مقدار حداکثر شدت‌های بارش در روش بلوک تناوبی برای زمان پایه و دوره پیش‌بینی در دوره بازگشت ۲ سال تحت سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر است با ۱/۹۷، ۱/۷۹، ۱/۰۹ و ۲/۰۹ و ۱/۹۶ که با افزایش ۱/۵ برابری در دوره بازگشت ۵۰ سال به ترتیب برابر است با ۵، ۴/۵۵، ۵/۳۰ و ۴/۹۸، و همچنین در روش مثلثی (ین و چاو)

مقادیر حداکثر شدت‌های بارش برای زمان پایه و دوره پیش‌بینی در دوره بازگشت ۲ سال تحت سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر است با ۰/۹۴، ۰/۸۶، ۱ و ۰/۹۴ که با افزایش ۱/۵ درصدی در دوره بازگشت ۵۰ سال به ترتیب برابر با ۲/۳۹، ۲/۱۷، ۲/۵۳ و ۲/۳۸ میلی‌متر بر دقیقه محاسبه شد. قبادی و همکاران در حوضه گلستان مشهد نشان دادند که روش بلوک تناوبی برای دوره بازگشت ۲ سال به میزان ۳۳ درصد نسبت به الگوی بارش یکنواخت، افزایش رواناب را نتیجه داده است. همچنین براساس نتایج این محققان، در روش بلوک تناوبی، زمان اوج هیدروگراف رواناب خروجی حوضه ۲۹ درصد نسبت به روش بارش یکنواخت کاهش پیدا کرده و حجم رواناب خروجی ۱۷ درصد افزایش داشته است. ایشان نتیجه‌گیری کرده‌اند که در مناطق شهری با توجه به تنوع در کاربری اراضی و حوضه‌بندی‌های متفاوت، روش بارش یکنواخت به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای هندسی حوضه‌ها، نتایج بهتری در مقایسه با روش بلوک تناوبی ارائه می‌دهد (قبادی، خدائشناس و مساعدی، ۱۳۹۸).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از روش‌های مثلثی (ین و چاو) و بلوک تناوبی برای محاسبه و ترسیم هایتوگراف بارش در ایستگاه سینوپتیک کاشان به‌عنوان یک ایستگاه شاخص مناطق خشک استفاده شد. در روش مثلثی تغییرات مقدار بارش به‌صورت خطی و تدریجی است، به‌صورتی که شیب قسمت صعودی هایتوگراف بیشتر از شیب قسمت نزولی آن است؛ اما در روش بلوک تناوبی تغییرات مقدار بارش به‌صورت نامنظم و غیرخطی است، به‌طوری‌که به‌شکل لحظه‌ای افزایش یا کاهش خواهد داشت. بنابراین سیلاب‌ها و هیدروگراف‌های برآوردشده با هریک از این دو روش، مطابق با الگوی هریک از روش‌های مذکور تغییر خواهد کرد. در جمع‌بندی و براساس نتایج این مطالعه، روش مثلثی (ین و چاو) به‌عنوان روش مناسب برای رسم هایتوگراف برای منطقه مورد مطالعه و احتمالاً مناطق دارای شرایط اقلیمی مشابه (مناطق خشک) معرفی می‌شود. برآورد درست رواناب‌های ناشی از بارش‌های حدی یکی از پارامترهای اساسی مورد نیاز برای مدیریت رواناب‌ها به‌ویژه در مناطق شهری است. بر این اساس توصیه می‌شود برای رسم هایتوگراف بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای شرایط اقلیمی مشابه منطقه مطالعاتی است، از روش مثلثی برای رسم هایتوگراف بارش استفاده شود.

References

- Afsharinia, M., Panahi, F., & Ehteram, M. (2023). Investigation of Climate Change Using CMIP6 Models Outputs (Case Study: Kashan Plain). *Irrigation and Water Engineering*, 14(2), 237-256. doi: 10.22125/iwe.2023.383176.1704.
- Awadallah, A. G., Elsayed, A. Y., & Abdelbaky, A. M. (2017). Development of design storm hyetographs in hyper-arid and arid regions: case study of Sultanate of Oman. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(20), 1-8.
- Baniasad, M., Saidalikhani, N., & Naghavi, H. (2020). Investigation of impact of semi-isolated and natural surfaces in moisture variations of optimized micro catchment systems. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 89-104. 10.22125/iwe.2019.100729
- Blanchet, J., Molinié, G., & Touati, J. (2018). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France, *Clim Dynam.*, 51, 799–812.
- Cea, L., & Fraga, I. (2018). Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 54(11), 8774-8791.
- Cheng, L & Agha, KA. (2014). Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate". *Scientific Reports*, Vol4, pp1-6.
- Duka, M., Lasco, J. D., Veyra Jr, C., & Aralar, A. (2018). Comparative Assessment of Different Methods in Generating Design Storm Hyetographs for the Philippines. *Journal of Environmental Science and Management*, 21(1).
- Ellouze, M., Abida, H., & Safi, R. (2009). A triangular model for the generation of synthetic hyetographs. *Hydrological sciences journal*, 54(2), 287-299.
- Ghobadi, F., Khodashenas, S. R., & Mosaedi, A. (2019). Comparison of uniform rainfall method and alternative block method in estimating runoff collecting system in order to control flood in urban areas with ASSA software (case study: Chehel Bazeh Golestan Basin). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(5), 1491-1503.
- Gong, Y., Liang, X., Li, X., Li, J., Fang, X., & Song, R. (2016). Influence of Rainfall Characteristics on Total Suspended Solids in Urban Runoff: A Case Study in Beijing, China. *Water*, 8, 278.
- Karimi, V., Soleimani, K., Nejadroshen, H., & Kaka, M., (2013). Comparison of some methods of determining the time distribution pattern of rainfall to estimate urban floods; A case study of Babolsar. *Scientific Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 4(1), 102-112.
- Khaksfidi, A., Nora, N., & Najafinjad, A. 2010. Time distribution pattern of rainfall in Sistan and Baluchistan province (Iran). *Journal of Water and Soil Protection Research*, 17, (1), 45-61.
- Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A., (1998.) A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *J of Hydrology*, 206 (1-2), 118-135.
- Noura, N., Khak Sefidi, A., & Razii, T. (2008). Comparison of Pilgrim and Huff methods to determine the time distribution pattern of precipitation in Zabol synoptic station. *Water and Soil Conservation Research (Agricultural Sciences and Natural Resources)*, 17(3), 143-160.
- Pan, C., Wang, X., Liu, L., Huang, H., & Wang, D. (1973). Improvement to the Huff Curve for Design Storms and Urban Flooding Simulations in Guangzhou, China. *Water*, 9, 411.
- Pilgrim D, & Cordery. H. (1976). Ian Closure to "Rainfall Temporal Patterns for Design Floods". *Journal of the Hydraulics Division*. 1021(6): 783-786. doi: 10.1061/JYCEAJ.0004557.
- Sadrianzade, M., Ghorbanizade Kharazi, H., Esmami, H., Fathian, H., & Telvari, A. (2021). Investigation of the impact of climate change on the trend and temperature distribution of precipitation phase in snow-rainy basin: Beheshtabad and Koohrang. *Journal of Water and Soil Conservation*, 28(4), 77-100. doi: 10.22069/jwsc.2022.19626.3509
- Shokoohi, A., & Habibnejad, R. (2019). Evaluating Intensity, Duration and Frequency of Short Duration Rainfalls Using a Regional Climate Change model (Case study: Tehran). *Iran-Water Resources Research*, 15(4), 412-424.
- Sifalda, V. (1973) Entwicklung eines Berechnungsregens für die Bemessung von Kanalnetzen. *Gwf Wasser/Abwasser*, 114, 435–440. (In German).

- Te Chow, V., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*; McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Terstriep, M.L., & Stall, J.B. (1974). The Illinois Urban Drainage Area Simulator, *ILLUDAS. Bulletin (Illinois State Water Survey)* no. 58. <https://hdl.handle.net/2142/94588>.
- Wang, M., Zhang, D.Q., Su, J., Trzcinski, A.P., Dong, J.W., & Tan, S.K. (2017). Future Scenarios Modeling of Urban Storm Water Management Response to Impacts of Climate Change and Urbanization. *Journal of Clean Soil Air Water*. 45(10).
- Yen, B.C., & Te Chow, V. (1980). Design Hyetographs for Small Drainage Structures. *J. Hydraul. Div.* 106, 1055–1076.
- Yousefi malekshah, M., Ghazavi, R., & Sadatinejad, J. (2019). Investigation of climate change effect on Temperature, Rainfall and intensity-duration-frequency Curves in Arid Areas (Case Study: Tehran-Karaj Basin). *Iranian journal of Ecohydrology*, 6(2), 431-445. doi: 10.22059/ije.2019.275072.1042.