

## استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی به کمک نظریه فرکتال و ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر آن (مطالعه موردی: بوشهر)

هدا بلوکی<sup>۱</sup>، مهدی فاضلی<sup>۲\*</sup>، مهدی شریف‌زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج

<sup>۳</sup> استادیار گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۶، بازنگری: ۱۴۰۰/۴/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۲۶، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۵/۲۶

### چکیده

جهت جلوگیری از بروز مشکلات آینده در سامانه‌های زهکشی شهری، باید اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی و تشدید احتمالی چرخه هیدرولوژیکی در نظر گرفته شود. منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش، ابزاری استاندارد جهت تجزیه و تحلیل ریسک هیدرولوژیکی و طراحی هستند. هدف مطالعه حاضر، استخراج منحنی‌ها در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از تئوری فرکتال (Fractal theory) در ایستگاه بوشهر است. با تبعیت کردن بیشینه شدت بارش از رفتار مونوفراکتالی (Mono-fractal)، منحنی‌ها برای گذشته (۱۹۸۲-۲۰۱۹) استخراج شدند. جهت به دست آوردن داده‌های بیشینه شدت بارش در آینده ابتدا عملکرد دو مدل ریزمقیاس نمایی آماری (Long Ashton Research Station - Weather Generator) LARS-WG و (Statistical) SDSM (DownScaling Model) در شبیه‌سازی بیشینه بارش روزانه با استفاده از شاخص‌های  $R^2$  (Coefficient of Determination)، RMSE (Root Mean Square Error)، MAE (Mean Absolute Error) و NSE (Nash-Sutcliffe) بررسی شد. نتایج نشان داد مدل LARS-WG از دقت بالاتری برخوردار است. سپس منحنی‌ها برای آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۸) استخراج شدند. مقایسه منحنی‌های گذشته و آینده نشان داد که منحنی‌های مربوط به داده‌های آینده تحت سناریوی RCP4.5 (Representative Concentration Pathway) در همه دوره بازگشت‌ها دارای افزایش بوده و تحت سناریوی RCP8.5، به جز در دوره بازگشت دو سال، در باقی دوره بازگشت‌ها افزایش داشته است. در مجموع میانگین منحنی‌ها  $۲۶/۲\%$  تحت سناریوی RCP4.5 و  $۹/۴۸\%$  تحت سناریوی RCP8.5 افزایش داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر اقلیم، گرمایش جهانی، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، منحنی‌های IDF، تئوری فرکتال، مونوفراکتال.

### ۱- مقدمه

بارندگی تأثیر می‌گذارد. به علاوه، مطالعات اخیر ثابت کرده که به دلیل بخار آب جوی زیاد، ممکن است حوادث باران شدیدتری رخ دهد (Umamahesh و Agilan، ۲۰۱۶).

تغییر اقلیم باعث تغییر در فراوانی و بزرگی بارش‌های شدید شده که بر استانداردهای طراحی برخی از سازه‌های هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد (Taha و Yousef، ۲۰۱۵). برای جلوگیری از بروز مشکلات آینده در سیستم‌های زهکشی شهری باید اثر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی و تشدید احتمالی چرخه هیدرولوژی در نظر گرفته شود (Rodríguez و همکاران، ۲۰۱۴). منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش (IDF) <sup>۱</sup>، یک ابزار استاندارد جهت تجزیه و تحلیل

افزایش دمای کره زمین در دهه‌های گذشته و تغییر در دیگر پارامترهای اقلیمی پدیده‌ای است که به آن تغییر اقلیم گفته می‌شود (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۳). علت اصلی تغییر اقلیم انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل: دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن، ازن و بخار آب است. این گازها به‌طور طبیعی تولید یا در نتیجه فعالیت‌های انسانی منتشر شده که باعث افزایش دمای کره زمین می‌شوند (Taha و Yousef، ۲۰۱۵). دمای اضافی ظرفیت نگهداری آب موجود در هوا را به‌ازای هر یک درجه سانتی‌گراد حدود ۷ درصد افزایش می‌دهد. در نتیجه به‌طور مستقیم بر

1. Intensity-Duration-Frequency

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۷۴-۳۱۰۰۵۱۲۲

آدرس ایمیل: hodaboolouki@gmail.com (ه. بلوکی)، fazeli@yu.ac.ir (م. فاضلی)، msharifzadeh@yu.ac.ir (م. شریف‌زاده).

منحنی‌های IDF با استفاده از تئوری فرکتال و متداول برای ایستگاه باران‌سنجی تنگه‌پنج واقع در شمال استان خوزستان استخراج شد. نتایج نشان داد حداکثر اختلاف منحنی‌های IDF به‌دست‌آمده از تئوری فرکتال و روش متداول از ۹/۸ درصد کم‌تر است (نوری قیداری، ۱۳۹۱).

از داده‌های بیشینه بارش سالانه با تداوم ۲۴ ساعته برای محاسبه بیشینه شدت بارش طراحی از ترکیب تئوری فرکتال و توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته برای ایستگاه باران‌سنجی تل‌زنگ، واقع در شمال استان خوزستان استفاده شد. نتایج نشان داد که بارش در بازه زمانی ۱ تا ۸ روز از رفتار مونوفراکتالی<sup>۳</sup> تبعیت می‌کند و داده‌های مشاهداتی بارش و رگبار طرح برآورد شده با تئوری فرکتال از انطباق خوبی برخوردار است (نوری قیداری، ۱۳۹۱). با استفاده از داده‌های بیشینه بارش روزانه در مقیاس سالانه، با روش تلفیق تئوری فرکتال و توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته، منحنی‌های IDF برای ایستگاه چناران استخراج شد. بررسی رفتار فرکتالی بارش نشان داد در بازه زمانی ۱ تا ۷ روز، بارش از خاصیت مونوفراکتالی تبعیت می‌کند و رگبار طرح برآورد شده توسط تئوری فرکتال با داده‌های مشاهداتی بارش از انطباق خوبی برخوردار است. سپس با استفاده از روش متداول که براساس تحلیل آماری داده‌های بارش حدی سالانه در تداوم‌های مختلف می‌باشد و رابطه تجربی قهرمان، این منحنی‌ها استخراج شدند. نتایج نشان داد متوسط خطای رابطه تلفیق تئوری فرکتال و توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته ۹/۳۴ می‌باشد که نسبت به رابطه تجربی قهرمان که دارای متوسط خطای ۱۶/۴۳ است، مقدار کم‌تری را نشان می‌دهد که این حاکی از برتری این روش است (اژدری مقدم و هروی، ۱۳۹۶). رگبار طرح در ایستگاه باران‌سنجی سد گتوند واقع در جنوب غرب ایران (استان خوزستان)، با استفاده از تئوری فرکتال برآورد شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد رگبار طرح به‌دست‌آمده از مدل مالتی‌فرکتال<sup>۴</sup> (چندفرکتال) با داده‌های مشاهداتی بارش انطباق خوبی دارد، اما مدل مونوفراکتال برآورد کم‌تری از رگبار طرح ارائه می‌دهد (نوری قیداری، ۱۳۹۱).

برای تخمین منحنی‌های IDF در یکی از ایستگاه‌های استان گوانگ‌دونگ<sup>۵</sup> در چین از داده‌های شش سال بارندگی با تداوم پنج دقیقه و با استفاده از یک مدل بارش مالتی‌فرکتال ساده با رفتار مالتی‌فرکتال استفاده شد. همچنین داده‌های بیشینه بارش سالانه با تداوم روزانه با طول دوره آماری ۲۲ ساله با توزیع پیرسون نوع سه<sup>۶</sup> برای به‌دست آوردن شدت بارندگی روزانه برای دوره بازگشت‌های مختلف برازش شد. نتایج شبیه شدت بارندگی ۲۴ ساعته مدل مالتی‌فرکتال با دوره بازگشت کم‌تر از ۱۰۰ سال بود

ریسک هیدرولوژیکی و طراحی هستند (Mohyont, ۲۰۰۴؛ Veneziano, ۲۰۰۲). تعیین احتمال فراوانی وقوع بارش‌های شدید با مدت و شدت‌های مختلف، گام اساسی در طراحی یک سازه کنترل سیل به‌منظور فراهم آوردن ابعاد اقتصادی سازه است. منحنی‌های IDF اطلاعات مفیدی در مورد وقوع سیل در یک منطقه نشان می‌دهند و این‌که در آینده میزان بارندگی خاص یا حجم مشخصی از جریان دوباره رخ می‌دهد (Basumatary و Sil, ۲۰۱۸). افزایش اخیر در شدت و فراوانی وقوع حوادث هیدرولوژیکی فاجعه‌آمیز، تهدید بزرگی برای اقتصاد جهانی است. این رویدادهای مهم با تغییرات اقلیم پیوند خورده است. از آنجا که انتظار می‌رود روند حوادث شدید بارش در آینده تغییر کند، این حالت بر منحنی‌های IDF تأثیر می‌گذارد، بنابراین باید این منحنی‌ها به‌روز شوند (Srivastav و همکاران، ۲۰۱۴).

نیاز به چنین درکی از این واقعیت ناشی می‌شود که سیستم‌های زهکشی موجود برای مقابله با سوابق گذشته حوادث بارندگی طراحی شده و ممکن است برای جبران ویژگی‌های بارش در آینده کافی نباشند (Shrestha و همکاران، ۲۰۱۷). اگر شدت بارش طراحی دست بالا گرفته شود در اجرای تأسیسات، هزینه‌های اضافی متوجه طرح می‌شود و در صورت دست پایین گرفتن شدت بارش طراحی، احتمال بروز خسارت‌های جانی و مالی افزایش می‌یابد، زیرا ظرفیت سیستم در آینده پاسخ‌گو نخواهد بود (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸).

در کشورهای در حال پیشرفت مانند ایران که وسعت زیادی دارد، یا ایستگاه‌های باران‌سنج وجود ندارد و یا طول دوره آماری ایستگاه‌ها کوتاه می‌باشد که این باعث می‌شود برآورد منحنی‌های IDF غیرممکن شود (زمانی نوری، ۱۳۹۰). روش‌های متداول برآورد به‌دلیل داشتن پارامترهای زیاد و نیاز داشتن به داده‌های بارش در تداوم‌های مختلف توسط هیدرولوژیست‌ها<sup>۷</sup> مورد انتقاد قرار گرفته است. روش جدیدی تحت عنوان تئوری فرکتال وجود دارد که علاوه بر کم بودن تعداد پارامترهای موردنیاز، تنها می‌تواند با داده‌های بیشینه بارش سالانه در تداوم روزانه، رگبار طرح در تداوم و دوره بازگشت موردنظر را تخمین زد (نوری قیداری، ۱۳۹۱).

منحنی‌های IDF در ایستگاه همدید اصفهان در سه دوره تاریخی، اخیر و آینده با استفاده از تئوری فرکتال استخراج شد. مقایسه منحنی‌ها در دو دوره اخیر و آینده نشان داد هرچند میانگین بارش‌ها به‌دلیل تشدید پدیده تغییر اقلیم کاهش یافته ولی شدت بارش‌های با تداوم کوتاه افزایش یافته یعنی منحنی‌ها به‌سمت بالا جابه‌جا شده‌اند (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸).

5. Guangdong  
6. Log-Pearson 3

2. Hydrologists  
3. Mono-fractal  
4. Multifractal

تداوم‌های کوتاه‌مدت بارش افزایش شدت تحت سناریوهای Dutto Aldo و Tien Thanh) RCP8.5 و RCP4.5 را نشان دادند (Remo، ۲۰۱۸). منحنی‌های IDF برای آینده (دهه ۲۰۵۰ و دهه ۲۰۸۰) در مالزی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) و نرم‌افزار Hyetos جهت تولید داده‌های ساعتی بارش تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تولید شد. رویکردهای آماری برای انتخاب بهترین توزیع، شامل توزیع‌های مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV)<sup>۱۲</sup>، گاما<sup>۱۳</sup> و گامبل<sup>۱۴</sup> بوده است که برای توزیع دیگر مناسب‌تر بوده است. بنابراین توزیع GEV برای تولید منحنی‌های IDF اعمال شد. نتایج نشان داد منحنی‌های ایجادشده برای سناریوهای آینده نسبت به وضعیت فعلی برای تمام دوره‌های بازگشت در نظر گرفته‌شده افزایش یافته است (Nasidi و همکاران، ۲۰۲۰).

هدف پژوهش استخراج منحنی‌های IDF برای دوره گذشته و آینده و بررسی تغییرات این منحنی‌ها در اثر تغییر اقلیم در ایستگاه بوشهر می‌باشد. در بیش‌تر مطالعات قبلی از روش‌های متداول برای استخراج منحنی‌های IDF استفاده شده است که به پارامترهای زیادی برای محاسبه نیاز دارد. از آنجاکه کاهش تعداد پارامترها باعث افزایش اعتمادپذیری می‌شود، در این پژوهش از روش نوین فرکتال جهت استخراج منحنی‌های IDF از داده‌های ۲۴ ساعته بارش استفاده شده است. همچنین در ایران کم‌تر مطالعه‌ای به مقایسه تغییرات منحنی‌های IDF در اثر تغییر اقلیم پرداخته است. بنابراین در تعداد زیادی از ایستگاه‌های هم‌دید و باران‌سنجی از جمله ایستگاه همدید بوشهر مطالعه‌ای در این خصوص صورت نگرفته است.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه ایستگاه همدید بوشهر، واقع در استان بوشهر است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه در جدول (۱) درج شده است. جهت برآورد هدف استخراج منحنی‌های IDF، داده‌های شش ساعته بارش با طول آماری ۳۸ سال (۱۹۸۲-۲۰۱۹) از پایگاه سازمان هواشناسی کشور دریافت شد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه همدید بوشهر

استان	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
بوشهر	۲۸/۹۶	۵۰/۸۲	۹

(Huang و همکاران، ۲۰۱۲). با استفاده از سری بارش‌های روزانه، منحنی‌های IDF برای ۱۰۰ ایستگاه باران‌سنجی بر فراز شبه‌جزیره ایبری<sup>۷</sup> و جزایر بالئاری<sup>۸</sup> براساس یک روش مبتنی بر خواص فرکتالی بارش استخراج شد. روش مقیاس زمانی از نوع ساده بر سری داده‌های بارش روزانه اعمال شد. از ۱۰۰ ایستگاه موردبررسی، ۳۶ ایستگاه جهت ارزیابی روش مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای حدود ۷۵ درصد ایستگاه‌های مورد آزمون، میزان خطای نسبی منحنی‌های IDF استخراج‌شده با روش مقیاس ساده، برای تداوم‌های بیش‌تر از دو ساعت، کم‌تر از ۲۰ درصد بوده است؛ در حالی‌که برای تداوم یک ساعت خطای نسبی به میزان ۵۷ درصد بوده است. این نتایج نشان داد که روش مقیاس زمانی ساده برای استخراج داده‌های کوتاه‌مدت بارش با تداوم بیش‌تر از یک ساعت، در مناطقی که فاقد داده‌های کوتاه‌مدت بارش هستند، می‌تواند بسیار مفید و کاربردی باشد (Rodríguez-Solà و همکاران، ۲۰۱۷). روابطی جهت استخراج منحنی‌های IDF برای حوضه رودخانه یودو<sup>۹</sup> در ژاپن، با استفاده از مدل فرکتال ارائه شد (Tachikawa و همکاران، ۲۰۰۷).

در مطالعه‌ای میزان بارش احتمالی آینده با تجزیه و تحلیل روند بیشینه بارش روزانه در مقیاس سالانه حاصل از سناریوهای RCP8.5 و با استفاده از روش عدم تغییرپذیری مقیاس برآورد شد. پس از بررسی خصوصیات مقیاس زمانی بیشینه بارش سالانه برای تداوم‌های مشاهده‌شده از ۶۰ ایستگاه فعال در اداره هواشناسی کره، کارایی روش عدم تغییرپذیری مقیاس با استفاده از سری‌های زمانی بیشینه بارش روزانه در مقیاس سالانه شبیه‌سازی‌شده برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ بررسی شد. سپس مقادیر احتمالی بارندگی در آینده برای تداوم‌های مختلف تحت شرایط تغییر اقلیم، با استفاده از سری‌های زمانی بیشینه بارش روزانه در مقیاس سالانه در معادله منحنی IDF حاصل از خصوصیات عدم تغییر مقیاس، برآورد شد. نتایج نشان داد در بیش‌تر ایستگاه‌ها روند افزایشی در میزان بارندگی احتمالی ایجاد شده است. همچنین در برخی مناطق روند کاهش پیش‌بینی شده است (Jeonghyeon و همکاران، ۲۰۱۶).

منحنی‌های IDF برای حوضه ووجیاتوبین<sup>۱۰</sup> در ویتنام برای دوره‌های گذشته (۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵) و آینده (۲۰۱۶ تا ۲۰۳۵)، ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ و ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹)، با تداوم‌های ۱ تا ۷۲ ساعت و دوره بازگشت‌های ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال، تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 تولید شد. نتایج نشان داد برای تمام دوره بازگشت‌ها، منحنی‌های IDF ساخته‌شده از

12. Generalized Extreme Value  
13. Gamma  
14. Gumbel  
15. Chi-squared test

7. Iberian Peninsula  
8. Balearic Island  
9. Yodo River  
10. Vu Gia Thu Bon  
11. Global Circulation Models

## ۲-۲- فرکتال

دوره پایه جهت مدل سازی ۳۸ سال یعنی از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۰۵)، با استفاده از شاخص های ضریب تعیین  $R^2$ ، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۱۸</sup>، میانگین مطلق خطا (MAE)<sup>۱۹</sup> و ناش-سانتکلیف (NSE)<sup>۲۰</sup> بررسی می شود. ضریب تعیین معیاری بدون بعد است که بین صفر تا یک تغییر می کند و بهترین مقدار آن برابر یک است. مقدار این ضریب از رابطه (۱) به دست می آید (لطیفی و همکاران، ۱۳۹۸).

$$R^2 = \frac{|\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)(S_i - \bar{S}_i)|^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (1)$$

شاخص ریشه میانگین مربعات خطا، یکی از شاخص های مهم برای ارزیابی کارایی مدل است. هرچه مقدار RSME به صفر نزدیک تر باشد نشان دهنده عملکرد بالای مدل ریزمقیاس نمایی آماری است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (2)$$

میانگین مطلق خطا یکی دیگر از معیارهای ارزیابی کارایی و دقت مدل است. هر چه میزان MAE کم تر باشد، نشان دهنده کارایی بیش تر مدل است و بهترین مقدار آن برابر صفر است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - S_i| \quad (3)$$

ضریب ناش-سانتکلیف نشان می دهد که خط رگرسیون بین داده های مشاهداتی و شبیه سازی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک نزدیک است، بنابراین مقدار بهینه آن یک است (لطیفی و همکاران، ۱۳۹۸).

$$NSE = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \right] \quad (4)$$

در روابط بالا،  $O_i$  داده های مشاهداتی مدل،  $S_i$  مربوط به داده های شبیه سازی شده مدل،  $\bar{O}_i$  میانگین داده های مشاهداتی،  $\bar{S}_i$  میانگین داده های شبیه سازی شده و  $n$  تعداد داده ها می باشد.

## ۲-۳-۲- انتخاب بهترین توزیع برای تداوم های مختلف

در نظریه آمار و احتمال، تابع توزیع احتمال بیانگر احتمال متغیر در یک بازه مشخص (در مورد متغیر تصادفی پیوسته) و یا احتمال هر یک از مقادیر متغیر تصادفی (در مورد متغیر ناپیوسته) است (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸). انتخاب بهترین توزیع برای سری های زمانی در نرم افزار EasyFit و به دست آوردن تابع توزیع چگالی احتمال (PDF)<sup>۲۱</sup> و پارامترهای آن در این بخش انجام

معرفی هندسه فرکتالی، به عنوان هندسه طبیعت، توسط مندلبرات<sup>۱۶</sup> ریاضی دان فرانسوی، مورد توجه بسیاری از محققان علوم و مهندسی قرار گرفت. از آن زمان تاکنون محققان توانسته اند با استفاده از آن، هندسه پدیده های پیچیده طبیعی را به خوبی تفسیر نمایند (مصطفی زاده و همکاران، ۱۳۹۶). یک شکل یا شیء رفتار فرکتالی دارد هرگاه:

۱- بعد آن صحیح نباشد.

۲- خاصیت خودتشابه داشته باشد به این معنا که از فرایند تکرار به وجود آمده باشد.

۳- در مقیاس میکروسکوپی پیچیدگی زیادی داشته باشد (نوری قیداری، ۱۳۹۱).

## ۲-۳-۲- روش اجرای پژوهش و استخراج فرمول ها

## ۲-۳-۱- آماده سازی داده ها

پس از دریافت داده های شش ساعته بارش، داده های بیشینه شدت بارش در تداوم های ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶ و ۴۲ ساعت برحسب میلی متر بر ساعت در سال محاسبه می شود. برای مقایسه نتایج دوره گذشته از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۹ به مدت ۳۸ سال و طول دوره پیش بینی آینده هم ۳۸ سال یعنی از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۸ در نظر گرفته می شود. مدل های عمومی گردش جو مهم ترین ابزار برای شبیه سازی وضعیت آینده پارامترهای اقلیمی هستند. یکی از بزرگ ترین مشکلات GCM ها بزرگ مقیاس بودن خروجی این مدل ها می باشد که برای حل این مشکل از روش های ریزمقیاس نمایی استفاده می شود. برای ریزمقیاس نمایی خروجی مدل های اقلیمی از دو روش دینامیکی و آماری استفاده می شود. روش دینامیکی عدم قطعیت زیادی دارد و از بین بردن این عدم قطعیت ها نیازمند هزینه و زمان است. در نتیجه روش آماری که محاسبات کمتری دارد و اجرای آن معمولاً راحت تر است، توصیه می شود (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۵).

از میان مدل های ریزمقیاس گردانی آماری، مدل های LARS-WG و SDSM از پرکاربردترین مدل های آماری هستند (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Hassan و همکاران، ۲۰۱۴). از این رو بسیاری از مطالعات اخیر بر ارزیابی و مقایسه این دو مدل از نظر توانایی در شبیه سازی بارش و وقوع بارش های شدید متمرکز شده اند (Hassan و همکاران، ۲۰۱۴). در این پژوهش نیز برای ریزمقیاس نمایی بارش و در نتیجه محاسبه بیشینه بارش روزانه در مقیاس سالانه از این دو مدل استفاده می شود. در ابتدا کارایی دو مدل LARS-WG و SDSM در مدل سازی بیشینه بارش (طول

19. Mean Absolute Error

20. Nash-Sutcliffe

21. Probability Distribution Function

16. Mandelbrot

17. Coefficient of Determination

18. Root Mean Square Error

### ۲-۳-۵- بررسی رفتار فرکتالی داده‌ها و روابط ریاضی مورد استفاده در پژوهش

اگر در پدیده‌هایی مثل بارش، سیلاب و غیره بعضی از خصوصیت‌های آماری با تغییر مقیاس تغییر نکنند، پدیده مورد بررسی به لحاظ مقیاسی تغییرناپذیر یا ساده است که این حالت را مونوفرکتال<sup>۲۵</sup> (تک‌فرکتالی) می‌گویند. در این حالت پدیده مورد بررسی با یک بعد قابل توصیف است. اگر نتوان پدیده مورد بررسی را با یک بعد توصیف کرد و برای توصیف به چندین بعد نیاز باشد، این حالت را مالتی‌فرکتال می‌گویند. در هیدرولوژی این خصوصیت‌ها جهت انتقال داده از یک مقیاس به یک مقیاس دیگر و یا از یک حوضه به یک حوضه دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸). به‌علاوه این مفهوم جهت تبدیل هیئوگراف<sup>۲۶</sup> بارش برای تداوم‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و بین بارش در تداوم‌های مختلف یک رابطه ریاضی ایجاد می‌شود. با استفاده از آن از روی داده‌های بارش روزانه، می‌توان داده‌های بارش در تداوم‌های مورد نظر را استخراج کرد (نوری قیداری، ۱۳۹۱).

متغیر تصادفی  $I_d$  که بیشینه شدت بارش در تداوم زمانی  $d$  در سال است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_d = \max \left[ \frac{1}{d} \int_{1-\frac{d}{2}}^{1+\frac{d}{2}} X(\xi) d\xi \right] \quad (7)$$

که در رابطه بالا،  $X(\xi)$  تابع پیوسته شدت بارش است. براساس آنالیز فرکتال‌ها متغیرهای تصادفی  $I_d$  و  $I_D$  دارای خصوصیت‌های مقیاسی به‌صورت رابطه زیر است:

$$I_d = \left(\frac{d}{D}\right)^n I_D \quad (8)$$

که در رابطه بالا  $I_D$  بیشینه شدت بارش سالانه در تداوم  $D$  و  $n$  توان مقیاس<sup>۲۷</sup> است (بلوکی، ۱۳۹۹). با استفاده از رابطه (۸) می‌توان داده‌های بیشینه شدت بارش در تداوم‌های مورد نظر را استخراج کرد.

برای محاسبه مقدار  $n$ ، در ابتدا گشتاورهای محاسبه شده در قسمت (۴-۳-۲) در مقابل تداوم‌ها در مختصات دو لگاریتمی رسم می‌شود. اگر خطوط به‌دست آمده خطی باشد، یعنی نوع مقیاس زمانی داده‌ها ساده (مونوفرکتال) و اگر خطوط به‌دست آمده خطی نباشد، یعنی نوع مقیاس زمانی داده‌ها چند مقیاسی (مالتی‌فرکتال) است (Afrin و همکاران، ۲۰۱۵؛ Burlando و Rosso، ۱۹۹۶؛ Casas-Castillo و همکاران، ۲۰۱۸؛ Langousis و Veneziano، ۲۰۰۷؛ Menabde و همکاران، ۱۹۹۹).

می‌شود. در این پژوهش از توزیع‌هایی که کاربرد بیش‌تری در زمینه مورد پژوهش دارند، استفاده شده است که شامل توزیع‌های گامیل بیشینه (Khelfi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Srivastav و همکاران، ۲۰۱۴؛ Taha و Yousef، ۲۰۱۵؛ Yu و همکاران، ۲۰۰۴)، مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) (Agilan و Umamahesh، ۲۰۱۶؛ Bara و همکاران، ۲۰۱۰؛ Shrestha و همکاران، ۲۰۱۷؛ Yousef و Taha، ۲۰۱۵)، لاگ نرمال<sup>۲۲</sup> (Basumatary و Sil، ۲۰۱۸؛ Binesh و همکاران، ۲۰۱۹؛ Khelfi و همکاران، ۲۰۱۷؛ Shrestha و همکاران، ۲۰۱۷) و لاگ پیرسون نوع سه (Sil و Basumatary، ۲۰۱۸؛ Huang و همکاران، ۲۰۱۲؛ Niemczynowicz، ۱۹۸۲) است.

### ۲-۳-۳- آزمون نیکویی برازش

آزمون‌های مختلف در نرم‌افزار EasyFit بررسی می‌شود و هر کدام از آزمون‌ها به هر توزیعی رتبه اختصاص می‌دهد و در نهایت بهترین توزیع انتخاب می‌گردد. آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۲۳</sup>، آندرسون-دارلینگ<sup>۲۴</sup> و کای اسکوتر به انتخاب توزیع برتر و برآورد پارامترها می‌پردازند (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به کاربرد بیش‌تر آزمون کای اسکوتر در زمینه مورد پژوهش، از این آزمون جهت انتخاب توزیع برتر استفاده شده که به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ صفوی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Shrestha و همکاران، ۲۰۱۷).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (O_i - E_i)^2 / E_i \quad (5)$$

### ۲-۳-۴- محاسبه گشتاورهای توزیع‌های آماری

فراوانی یا احتمال یک رخداد تصادفی را می‌توان به‌عنوان جرم در نظر گرفت و گشتاورهای مراتب مختلف آن را محاسبه کرد. گشتاور  $r$ م حول مبدأ طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$q_r = \sum_{i=1}^n f(x_i) x_i^r \quad (6)$$

در رابطه بالا  $n$  تعداد سال‌های آماری،  $f(x_i)$  تابع توزیع PDF،  $x_i$  داده‌های بیشینه شدت بارش و  $r$  مرتبه گشتاور است (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعات مختلف بازه‌های بین ۰/۲ تا ۴ را برای مرتبه گشتاور انتخاب کرده‌اند (Bara و همکاران، ۲۰۱۰؛ Gerasetti، ۲۰۱۱؛ Llabrés Brustenga، ۲۰۲۰؛ Rodríguez-Solà و همکاران، ۲۰۱۴) چون در این بازه به‌خوبی رفتار فرکتالی داده‌ها قابل تشخیص است (نوری قیداری، ۱۳۹۱). در این پژوهش گشتاورها با مراتب ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ محاسبه می‌شود.

25. Monofractal  
26. Hyetograph  
27. Scaling exponent

22. Lognormal  
23. Kolmogorov-Smirnov  
24. Anderson-Darling test

$$I_{d,T} = \frac{E(I_{24})}{24^n} (1 + C_v K_T) d^n \quad (16)$$

با استفاده از رابطه (۱۶) می‌توان منحنی‌های IDF در دوره بازگشت‌های موردنظر را با استفاده از داده‌های روزانه بارش استخراج نمود. در این پژوهش منحنی‌ها برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال محاسبه می‌شوند.

### ۲-۳-۶- محاسبه خطای تئوری

برای مقایسه کمی نتایج حاصل از تئوری فرکتال و داده‌های تجربی، از روش تفاوت نسبی (RD) استفاده می‌شود که برابر است با:

$$RD = \left| \frac{X-Y}{Y} \right| \times 100 \quad (17)$$

در این رابطه،  $Y$  شدت بارش داده‌های تجربی و  $X$  شدت بارش محاسبه‌شده توسط تئوری فرکتال است (Bara و همکاران، ۲۰۱۰؛ نوری قیداری، ۱۳۹۱؛ نوری قیداری، ۱۳۹۱؛ صفوی و همکاران، ۱۳۹۸). برای تئوری فرکتال در حوزه‌های کاربردی مختلف خطایی در حد ۸/۵ تا ۱۶/۵ درصد قابل قبول است (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸).

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از انتخاب بهترین توزیع برای سری‌های زمانی در نرم‌افزار EasyFit با آزمون کای اسکور نشان داد که برای تداوم‌های ۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، ۳۰، ۳۶ و ۴۲ ساعت به ترتیب توزیع‌های گامبل بیشینه، مقادیر حدی تعمیم‌یافته، گامبل بیشینه، لاگ پیرسون نوع سه، مقادیر حدی تعمیم‌یافته، لاگ پیرسون نوع سه و گامبل بیشینه مناسب است. با یافتن بهترین توزیع و محاسبه تابع توزیع چگالی احتمال، گشتاورهای مراتب مختلف محاسبه‌شده که نتایج در جدول (۲) درج شده است.

جدول ۲- محاسبه گشتاورها برای تداوم‌های مختلف بارش

تداوم/گشتاور	q 0.5	q 1	q 1.5	q 2.5	q 3.5
۶	۱۱/۱۹	۲۷/۳۴	۶۸/۰۱	۴۴۴/۳۹	۳۱۲۰/۰۸
۱۲	۱۲/۳۸	۲۴/۱۸	۴۸/۳۱	۲۰۶/۳۵	۹۶۰/۸۵
۱۸	۱۳/۹۹	۲۲/۹۷	۳۸/۶۸	۱۱۸/۲۶	۴۰۰/۳۱
۲۴	۱۵/۳۷	۲۲/۶۲	۳۴/۲۱	۸۴/۶۷	۲۳۰/۸۶
۳۰	۱۷/۵۸	۲۳/۱۷	۳۱/۳۳	۶۱/۷۶	۱۳۴/۶۵
۳۶	۱۷/۴۷	۲۱/۷۰	۲۷/۸۱	۴۹/۸۱	۹۹/۰۰
۴۲	۱۹/۰۶	۲۲/۰۲	۲۶/۱۷	۴۰/۱۹	۶۸/۶۵

Rodríguez و همکاران، ۲۰۱۴). سپس شیب خطوط رسم شده محاسبه می‌شود و از میانگین‌گیری شیب‌ها، توان مقیاس به‌دست می‌آید. اگر براساس خاصیت مونوفرکتالی از دو طرف رابطه (۸) گشتاور مرتبه  $q$  گرفته شود، داریم:

$$E(I_d^q) = \left(\frac{d}{D}\right)^{K(q)} E(I_D^q) = \frac{E(I_D^q)}{D^{K(q)}} d^{K(q)} \quad (9)$$

در حالت مونوفرکتالی، توان مقیاس ( $K(q)$ ) برای گشتاور مرتبه  $q$  برابر  $n \times q$  می‌باشد، یعنی  $K(q)$  تابعی خطی از  $q$  است. در حالت مالتی‌فرکتال توان مقیاس تابع محدبی از  $q$  است. اگر از رابطه (۹) لگاریتم گرفته شود، داریم:

$$\text{Log } E(I_d^q) = K(q) \text{Log} \left(\frac{d}{D}\right) + \text{Log } E(I_D^q) \quad (10)$$

رابطه (۱۰) نشان می‌دهد که  $K(q)$  شیب خط همبستگی  $\text{Log } E(I_d^q)$  در برابر لگاریتم دوام بارش است. با بررسی تئوری شکل‌های خودمتشابه در حالت مقیاس ساده از رابطه (۹)، میانگین و واریانس بارش در دو تداوم مختلف از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

$$E(I_d) = \frac{E(I_D)}{D^n} d^n \quad (11)$$

$$E(I_d^2) = \frac{E(I_D^2)}{D^{2n}} d^{2n} \quad (12)$$

$$\text{Var}(I_d) = E(I_d^2) - E^2(I_d) \Rightarrow \text{Var}(I_d) = \frac{\text{Var}(I_D)}{D^{2n}} d^{2n} \quad (13)$$

که در رابطه‌های بالا  $E(I_d)$  میانگین شدت بارش و  $\text{Var}(I_d)$  واریانس شدت بارش در تداوم  $d$  است. شدت بارش با تداوم  $d$  در دوره بازگشت  $T$  براساس رابطه چاو<sup>۲۸</sup> به‌صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$I_{d,T} = E(I_d) + K_T \sqrt{\text{Var}(I_d)} \quad (14)$$

در رابطه بالا  $K_T$  عامل فراوانی<sup>۲۹</sup> می‌باشد که تابع دوره بازگشت و نوع توزیع احتمالاتی است. با جایگذاری رابطه‌های (۱۱) و (۱۳) در رابطه (۱۴) خواهیم داشت:

$$I_{d,T} = \frac{E(I_D)}{D^n} (1 + C_v K_T) d^n \quad (15)$$

که در رابطه بالا،  $C_v$  ضریب تغییرات بیشینه شدت بارش سالانه در تداوم  $D$  است. با استفاده از این رابطه می‌توان منحنی‌های IDF در دوره بازگشت‌های موردنظر را استخراج کرد. با توجه به این‌که داده‌های روزانه بارش با دقت مناسب و به‌سادگی در دسترس است، بهتر است  $D$  برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شود، بنابراین رابطه (۱۵) به‌صورت زیر ساده می‌شود (بلوکی، ۱۳۹۹):

30. Relative Difference

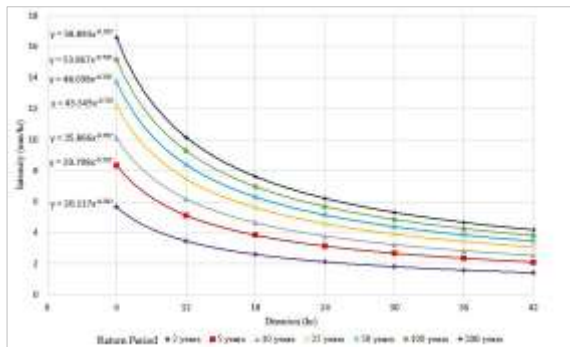
28. Chow

29. Frequency Factor

با استفاده از رابطه (۱۷) خطای تئوری به دست می آید. نتایج در جدول (۳) درج شده است. با توجه به داده‌های این جدول، تمام خطاها در محدوده مجاز قرار داشته بنابراین میزان خطاها قابل قبول است و می‌توان با اطمینان منحنی‌ها را با استفاده از تئوری فرکتال استخراج کرد. دسته منحنی‌های استخراج شده برای دوره گذشته در شکل (۳) ترسیم شده است.

جدول ۳- درصد خطای تئوری فرکتال

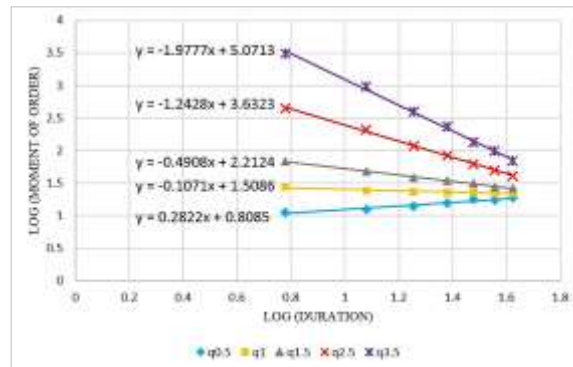
تداوم	۶	۱۲	۱۸	۳۰	۳۶	۴۲
درصد خطا	۳/۹۶	۷/۲۹	۴/۸۹	۱/۹۹	۳/۷۱	۵/۲۶



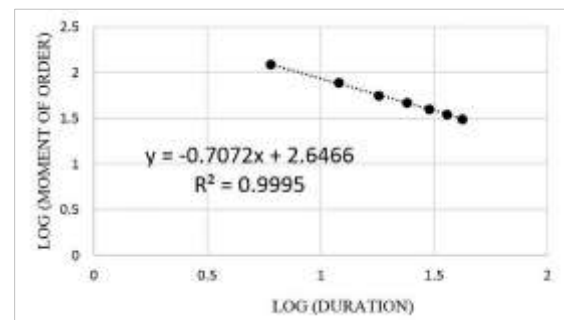
شکل ۳- دسته منحنی‌های IDF برای سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۹

نتایج حاصل از ارزیابی کارایی دو مدل LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی بیشینه بارش در جدول (۴) درج شده است. نشان می‌دهد مدل LARS-WG از دقت بالاتری برخوردار است. بنابراین جهت استخراج منحنی‌های IDF در دوره آینده از داده‌های تولیدشده ۳۸ سال آینده مدل LARS-WG استفاده می‌شود. دسته منحنی‌های استخراج شده برای دوره آینده تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در شکل‌های (۴) و (۵) ترسیم شده است. مقایسه دسته منحنی‌های IDF تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 (شکل‌های (۴) و (۵)) نشان می‌دهد که شدت منحنی‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف تحت سناریوی RCP4.5 بیش‌تر از RCP8.5 بوده است. به‌عنوان مثال در دوره بازگشت دو سال تحت سناریوی RCP4.5 بیشینه شدت بارش در تداوم ۶ ساعت به بیش از ۶ میلی‌متر بر ساعت می‌رسد، درحالی‌که تحت سناریوی RCP8.5 این مقدار کم‌تر از ۶ میلی‌متر بر ساعت است. همچنین در دوره بازگشت‌های بالاتر به‌عنوان مثال دوره بازگشت ۲۰ سال، بیشینه شدت بارش در تداوم ۶ ساعت تحت سناریوی RCP4.5 به حدود ۲۲ میلی‌متر بر ساعت می‌رسد، درحالی‌که تحت سناریوی RCP8.5 این مقدار به کم‌تر از ۲۰ میلی‌متر بر ساعت می‌رسد. این مقدار در منحنی‌های مربوط به دوره گذشته (شکل (۳)) به حدود ۱۷ میلی‌متر بر ساعت می‌رسد که از عدد هر دو سناریو کم‌تر است. با توجه به شکل‌های (۳) تا (۵) افزایش شدت منحنی‌های آینده

گشتاورهای محاسبه شده در مقابل تداوم‌ها در مختصات دو لگاریتمی در شکل (۱) رسم شده است که خطی بودن نمودارها نشان‌دهنده تبعیت از خاصیت عدم تغییرپذیری مقیاس یا رفتار مونوفراکتالی دارد. بنابراین می‌توان برای استخراج منحنی‌های IDF از رابطه (۱۶) استفاده کرد. در شکل (۲) خط تغییرات تابع مقیاس که حاصل میانگین‌گیری پنج شیب شکل (۱) می‌باشد، رسم شده که نشان می‌دهد توان مقیاس در ایستگاه بوشهر ۰/۷۰۷۲- است.



شکل ۱- گشتاور وزنی داده‌های بیشینه شدت بارش با تداوم‌های مختلف

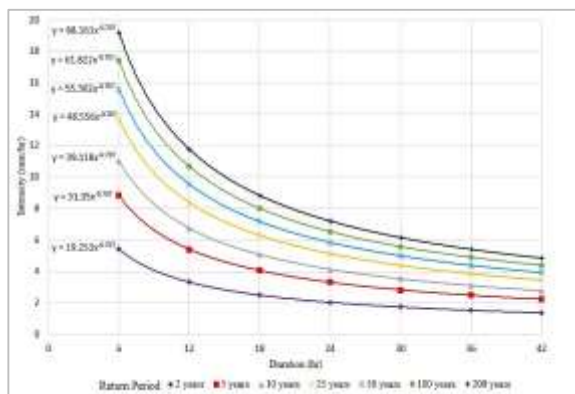


شکل ۲- خط تغییرات تابع مقیاس

همچنین برای استفاده از رابطه (۱۶) نیاز به محاسبه پارامتر عامل فراوانی است. همان‌طور که ذکر شد برای بیشینه شدت بارش با تداوم ۲۴ ساعت، توزیع لاگ پیرسون نوع سه مناسب است. با استفاده از رابطه (۱۸) می‌توان مقدار عامل فراوانی در توزیع لاگ پیرسون نوع سه را محاسبه کرد (Cheng و همکاران، ۲۰۱۱؛ Eng و Singh، ۲۰۱۷).

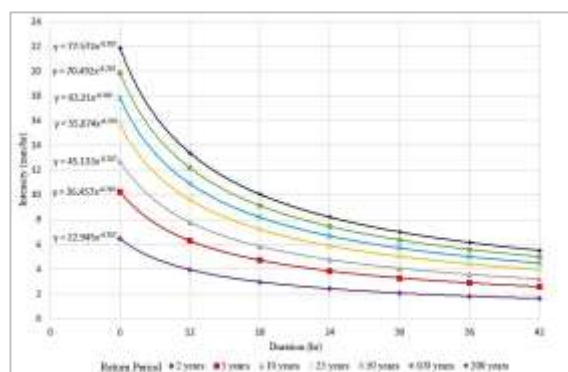
$$K_T = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + zk^4 + \frac{1}{3}k^5 \quad (18)$$

که در رابطه بالا  $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$  و  $k = C_s/6$  است.  $z$  انحراف نرمال استاندارد،  $\mu$  میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار می‌باشد. برای محاسبه خطای تئوری در ابتدا با استفاده از رابطه (۸) داده‌های بیشینه شدت بارش با استفاده از تئوری فرکتال محاسبه می‌شود. سپس



شکل ۵- دسته منحنی‌های IDF برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۸ تحت سناریوی RCP8.5

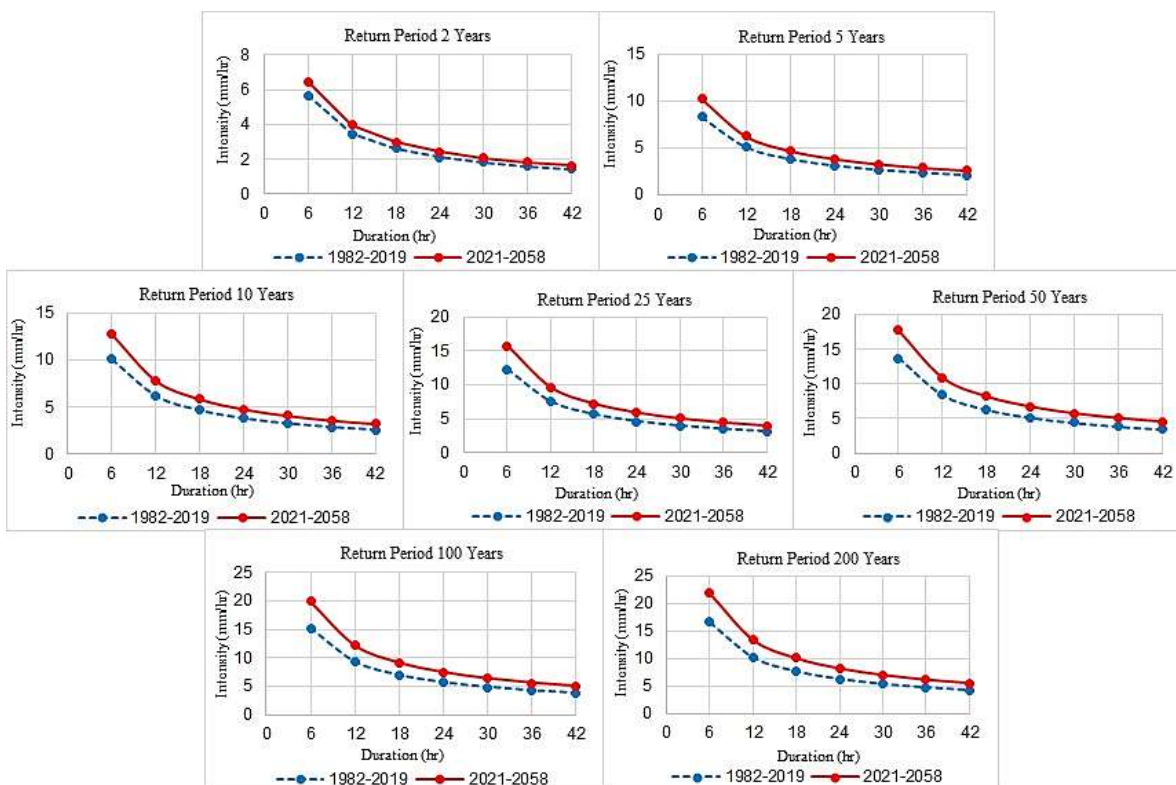
(۲۰۲۱ تا ۲۰۵۸) نسبت به گذشته (۱۹۸۲ تا ۲۰۱۹) تحت سناریوی RCP4.5 بیش‌تر از RCP8.5 است.



شکل ۴- دسته منحنی‌های IDF برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۸ تحت سناریوی RCP4.5

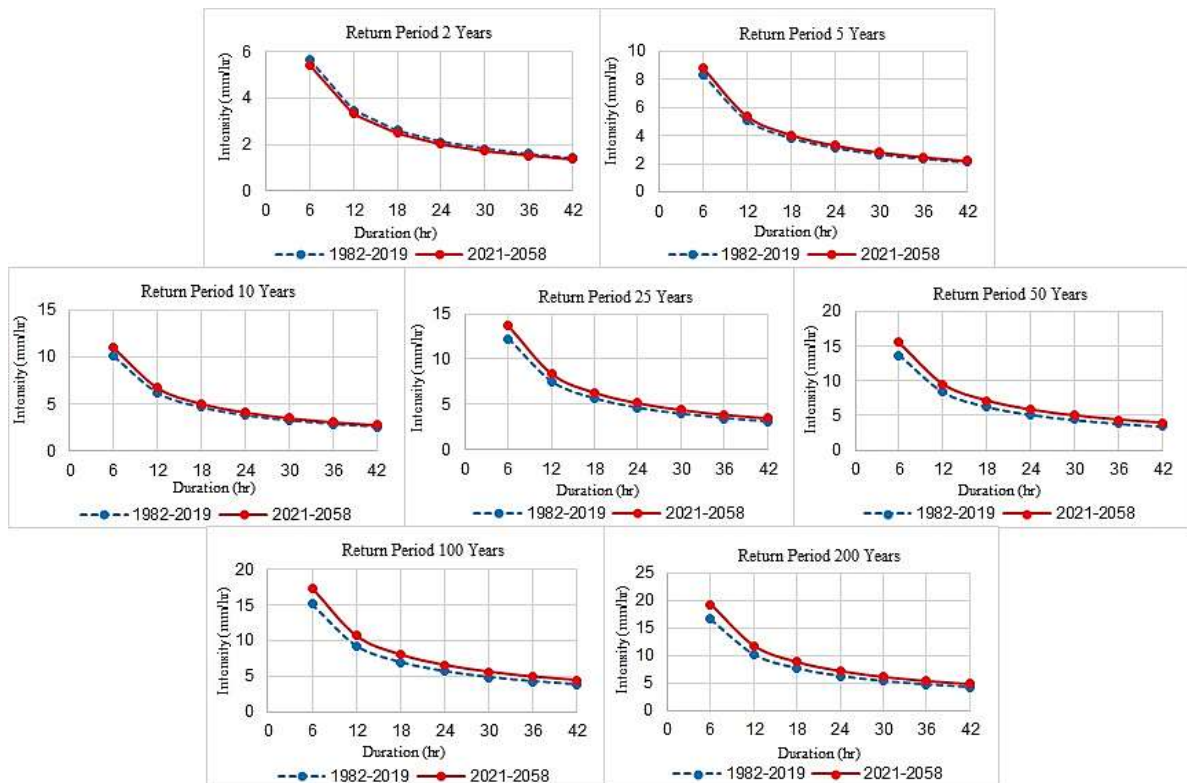
جدول ۴- ارزیابی کارایی مدل LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی بیشینه بارش روزانه

شاخص	NSE		MAE		RMSE		R <sup>2</sup>	
	SDSM	LARS-WG	SDSM	LARS-WG	SDSM	LARS-WG	SDSM	LARS-WG
مدل	۰/۶۷۰۸	۰/۹۶۹۶	۲۰/۴۹۳۳	۴/۳۳۳۳	۲۵/۳۶۱۲	۷/۷۰۶۰	۰/۶۹۳۷	۰/۹۸۱۲
بوشهر								



شکل ۶- مقایسه منحنی‌های IDF مربوط به دوره تاریخی و آینده (تولید داده‌های آینده با مدل LARS-WG تحت سناریوی RCP4.5) در دوره بازگشت‌های مختلف، ایستگاه بوشهر





شکل ۷- مقایسه منحنی‌های IDF مربوط به دوره تاریخی و آینده (تولید داده‌های آینده با مدل LARS-WG تحت سناریوی RCP8.5) در دوره بازگشت‌های مختلف، ایستگاه بوشهر

#### ۴- نتیجه‌گیری

جهت آشکارسازی تغییرات شدت بارندگی در تداوم‌های مختلف در گذشته (۱۹۸۲ تا ۲۰۱۹) و آینده (۲۰۲۱ تا ۲۰۵۸)، کلیه دوره بازگشت‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های (۶) و (۷) مقایسه منحنی‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶)، تحت سناریوی RCP4.5 بیشینه شدت بارش در همه دوره بازگشت‌ها افزایش داشته است؛ یعنی منحنی‌ها به سمت بالا جابه‌جا شده‌اند. تحت سناریوی RCP8.5 (شکل (۷))، به جز دوره بازگشت ۲ سال که بیشینه شدت بارش کاهش یافته، در باقی دوره بازگشت‌ها افزایش داشته است. افزایش بیشینه شدت بارش در دوره بازگشت‌های مختلف در آینده با نتایج پژوهش صورت گرفته در ایستگاه هم‌دید اصفهان (صفوی و همکاران، ۱۳۹۸)، حوضه ووجیاتوبن در ویتنام (Tien Thanh و Dutto Aldo Remo، ۲۰۱۸) و مالزی (Nasidi و همکاران، ۲۰۲۰) مطابقت دارد.

برای مقایسه نتایج دو دوره، برای هر دوره بازگشت، میزان درصد تغییرات دوره آینده نسبت به دوره گذشته محاسبه گردیده و از این درصد تغییرات میانگین‌گیری شده تا مشخص گردد به‌طور میانگین منحنی‌های IDF چه میزان تغییرات داشته‌اند. نتایج در جدول (۵) درج شده است. با توجه به جدول (۵)، مقایسه منحنی‌های گذشته با منحنی‌های آینده در ایستگاه بوشهر، براساس داده‌های تولیدشده بارش روزانه در آینده توسط مدل

LARS-WG نشان می‌دهد که، منحنی‌های IDF تا پایان سال ۲۰۵۸ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌طور میانگین به-ترتیب به‌اندازه ۲۶/۲۰ درصد و ۹/۴۸ درصد به سمت بالا جابه‌جا می‌شوند؛ این نتیجه به‌معنای افزایش میانگین بیشینه شدت بارش‌ها در تداوم‌ها و دوره بازگشت‌های مختلف به میزان یادشده است. بدین ترتیب، برای ایستگاه بوشهر، سناریوی RCP4.5 در مقایسه با سناریوی RCP8.5 درصد افزایش بیش‌تری را در منحنی‌های IDF پیش‌بینی کرده است.

جدول ۵- درصد تغییرات منحنی‌های IDF در آینده نسبت به گذشته

LARS-WG		مدل
RCP8.5	RCP4.5	سناریو
+ ۹/۴۸ %	+ ۲۶/۲۰ %	درصد تغییرات

با توجه به افزایش شدت منحنی‌ها در آینده، مدیریت سیلاب سازه‌ای در ایستگاه بوشهر شایسته توجه است. همچنین از نتایج این پژوهش می‌توان جهت برنامه‌ریزی مدیریت آب منطقه‌ای بوشهر و بررسی گزینه‌های سازگاری با پیامدهای تغییر اقلیم در آینده استفاده کرد. پیشنهاد می‌شود منحنی‌های IDF برای

آینده‌ای دورتر استخراج و سپس با منحنی‌های IDF دوره گذشته و آینده نزدیک مقایسه شود.

##### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از سازمان هواشناسی کشور جهت در اختیار گذاشتن داده‌های موردنیاز هواشناسی تقدیر و تشکر می‌نمایند.

##### ۶- مراجع

اژدری مقدم م، هروی ز، "ارزیابی روش‌های استخراج منحنی IDF با رابطه مبتنی بر ماهیت فرکتالی بارش"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۳۹۶، ۲۴ (۶)، ۲۷۱-۲۸۲.

بختیاری ب، پورموسوی ش، سیاری ن، "بررسی اثر تغییر اقلیم بر منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی بارش در ایستگاه بابلسر طی دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰"، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳۹۳، ۸ (۴)، ۶۹۴-۷۰۴.

بلوکی ه، "اشکارسازی تغییر اقلیم و استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی با استفاده از تئوری فرکتال برای سه استان ساحلی جنوب ایران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، ۱۳۹۹.

بینش ن، نیک‌سخن م ح، سارنگ ا، "مطالعه رژیم بارش و دبی حداکثر رواناب شهری در شرایط اقلیمی آینده (مطالعه موردی: حوضه سیل برگردان غرب"، نشریه مهندسی عمران امیر کبیر، ۱۳۹۷، ۵۰ (۵)، ۸۱۵-۸۲۵.

جعفرزاده ا، خاشعی‌سیوکی ع، شهیدی ع، "ارزیابی دو روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و SDSM در برآورد تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی (مطالعه موردی: دشت بیرجند)"، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۳۹۵، ۲۳ (۴)، ۳۰۹-۳۲۲.

زمانی نوری ع ر، "استخراج منحنی‌های IDF از داده‌های روزانه بارش در ایستگاه هواشناسی ساوه"، مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۱۳۹۰، ۱ (۲)، ۶۱-۶۹.

صفوی ح ر، دادجو ش، نعیمی گ، "استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی (IDF) در شرایط تغییر اقلیم، مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک اصفهان"، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳۹۸، ۱۵ (۲)، ۲۱۷-۲۲۷.

گودرزی م، صلاحی ب، حسینی س ا، "ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه"، نشریه علمی- پژوهشی، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۳۹۴، ۹ (۳۱)، ۱۱-۲۳.

لطیفی م، ذاکری نیری م، معظمی‌گودرزی ص، "بررسی آثار تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی ایستگاه‌های تکاب و سقز در حوضه زرینه‌رود با استفاده از شبیه LARS-WG" مجله مهندسی منابع آب، ۱۳۹۸، ۱۲ (۴۳)، ۳۷-۴۸.

مصطفی‌زاده ر، ذبیحی م، ادهمی م، "تحلیل زمانی و مکانی تغییرات بارش ماهانه در استان گلستان به کمک بعد فرکتالی"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۳۹۶، ۹ (۱)، ۳۴-۴۵.

نوری قیداری م ح، "استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی از داده‌های روزانه بارش با استفاده از تئوری فرکتال"، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۱۳۹۱، ۲۶ (۳)، ۷۱۸-۷۲۶.

نوری قیداری م ح، "برآورد رگبار طرح با استفاده از تئوری مالتی‌فرکتال در ایستگاه سد گتوند"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۱، ۲۲ (۱)، ۱۴۵-۱۵۴.

نوری قیداری م ح، "تعیین حداکثر شدت بارش طراحی با استفاده از روش تلفیقی تئوری فرکتال و توزیع احتمالاتی مقادیر حدی تعمیم یافته"، علوم و مهندسی آبیاری (مجله علمی کشاورزی)، ۱۳۹۱، ۳۵ (۲)، ۹۰-۸۳.

Agilan V, Umamahesh NV, "Is the covariate based non-stationary rainfall IDF curve capable of encompassing future rainfall changes?", Journal of Hydrology, 2016, 541, 1441-1455.

Bara M, Gaál L, Kohnová S, Szolgay J, Hlavčová K, "On the use of the simple scaling of heavy rainfall in a regional estimation of IDF curves in Slovakia", Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2010, 58 (1), 49-63.

Basumatary V, Sil BS, "Generation of rainfall intensity-duration-frequency curves for the Barak River Basin", Meteorology Hydrology and Water Management, Research and Operational Applications, 2018, 6, 1-11.

Burlando P, Rosso R, "Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation", Journal of Hydrology, 1996, 187 (1-2), 45-64.

Casas-Castillo MC, Rodríguez-Solà R, Navarro X, Russo B, Lastra A, González P, Redaño A, "On the consideration of scaling properties of extreme rainfall in Madrid (Spain) for developing a generalized intensity-duration-frequency equation and assessing probable maximum precipitation estimates", Theoretical and applied climatology, 2018, 131 (1), 573-580.

Ceresetti D, "Space-time structure of heavy rainfall events: application to the Cévennes-Vivarais region", Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2011.

Cheng KS, Hou JC, Liou JJ, Wu YC, Chiang JL, "Stochastic simulation of bivariate gamma distribution: a frequency-factor based approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment", 25 (2), 107-122.

- ungauged catchments based on scaling properties", Disaster Prevention Research Institute Annuals B, 2007, 50 (B), 33-43.
- Tien Thanh N, Dutto Aldo Remo L, "Projected changes of precipitation IDF curves for short duration under climate change in central Vietnam", Hydrology, 2018, 5 (3).
- Veneziano D, Furcolo P, "Multifractality of rainfall and scaling of intensity-duration-frequency curves", Water resources research, 2002, 38 (12), 1-42.
- Yousef LA, Taha BMJ, "Adaptation of water resources management to changing climate: the role of Intensity-Duration-Frequency curves", International Journal of Environmental Science and Development, 2015, 6 (6), 478-483.
- Yu PS, Yang TC, Lin CS, "Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall", Journal of Hydrology, 2004, 295 (1-4), 108-123.
- Choi J, Lee O, Kim S, "Analysis of the effect of climate change on IDF curves using scale-invariance technique: Focus on RCP 8.5", Journal of Korea Water Resources Association, 2016, 49 (12), 995-1006.
- Hassan Z, Shamsudin S, Harun S, "Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature", Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116 (1), 243-257.
- Huang Q, Chen Y, Xu S, Liu J, "A simple multifractal model for rainfall IDF analysis in China", In 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE. pp: 1461-1465, 2012.
- Khelifi MEA, Touaibia B, Guastaldi E, "Regionalisation of the "intensity-duration-frequency" curves in Northern Algeria", Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10 (20), 1-13.
- Langousis A, Veneziano D, "Intensity-duration-frequency curves from scaling representations of rainfall", Water Resources Research, 2007, 43 (2).
- Llabrés Brustenga A, "Intensity-duration-frequency of rainfall in catalunya maximum expected precipitation and idf relationships at high temporal and spatial resolution", Doctoral dissertation, Universitat de Barcelona, 2020.
- Menabde M, Seed A, Pegram G, "A simple scaling model for extreme rainfall", Water Resources Research, 1999, 35 (1), 335-339.
- Mohyomont B, Demarée GR, Faka DN, "Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa-comparison of techniques and results", Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4 (3), 375-387.
- Nasidi NM, Wayayok A, Fikri Abdullah A, Saufi Mohd Kassim M, "Current and future intensity-duration-frequency curves based on weighted ensemble GCMs and temporal disaggregation", Sains Malaysiana, 2020, 49 (10), 2359-2371.
- Niemczynowicz J, "Areal intensity-duration-frequency curves for short term rainfall events in Lund", Hydrology Research, 1982, 13 (4), 193-204.
- Rodríguez R, Navarro X, Casas MC, Ribalaygua J, Russo B, Pouget L, Redaño A, "Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain)", International Journal of Climatology, 2014, 34 (3), 643-654.
- Rodríguez-Solà R, Casas-Castillo MC, Navarro X, Redaño Á, "A study of the scaling properties of rainfall in Spain and its appropriateness to generate intensity-duration-frequency curves from daily records", International Journal of Climatology, 2017, 37 (2), 770-780.
- Shrestha A, Babel MS, Weesakul S, Vojinovic Z, "Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves under climate change uncertainty: the case of Bangkok, Thailand", Water, 2017, 9 (2), 145.
- Singh VP, Eng D, "Handbook of applied hydrology", McGraw-Hill, Inc, 2017.
- Srivastav RK, Schardong A, Simonovic SP, "Equidistance quantile matching method for updating IDF Curves under climate change", Water Resources Management, 2014, 28 (9), 2539-2562.
- Tachikawa Y, Sayama T, Takara K, "Regional rainfall intensity-duration-frequency relationships for

## EXTENDED ABSTRACT

# Extraction of Intensity-Duration-Frequency Curves Using Fractal Theory and Evaluation of Climate Change on it (Case Study: Bushehr)

Hoda Bolouki<sup>a</sup>, Mehdi Fazeli<sup>a,\*</sup>, Mehdi Sharifzadeh<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

<sup>b</sup> Department of Mathematics, Yasouj University, Yasouj, Iran

**Received:** 24 February 2021; **Review:** 16 July 2021; **Accepted:** 17 August 2021

---

### Keywords:

Climate change, Global warming, Intensity-Duration-Frequency curves, IDF curves, Fractal theory, Monofractal.

---

## 1. Introduction

Climate change has caused changes in the frequency and magnitude of heavy rainfall, which affects the design standards of some hydrological structures (Yousef and Taha, 2015). Rainfall intensity-duration-frequency (IDF) curves are a standard tool for hydrological risk analysis and design (Mohyont, 2004; Veneziano, 2002). IDF curves show useful information about the occurrence of floods in an area and that in the future a certain amount of rainfall or a certain volume of flow will return again (Basumatary and Sil, 2018). Because the trend of severe rainfall events is expected to change in the future, this affects IDF curves, so these curves need to be updated (Srivastav et al. 2014). The need for such an understanding stems from the fact that existing drainage systems are designed to deal with past rainfall events and may not be sufficient to compensate for future rainfall characteristics (Shrestha et al. 2017). In developing countries such as Iran, the large country area as well as the shortage of rain gauge stations and/or the statistical period of the recorded data, makes it difficult to estimate IDF curves (Zamani Nouri, 2011).

## 2. Methodology

The fractal theory is a new method that enables us to generate IDF curves for a desired duration and return period based on a few number of required parameters (i.e. maximum annual rainfall data in daily duration) (Nouri Gheidari, 2012).

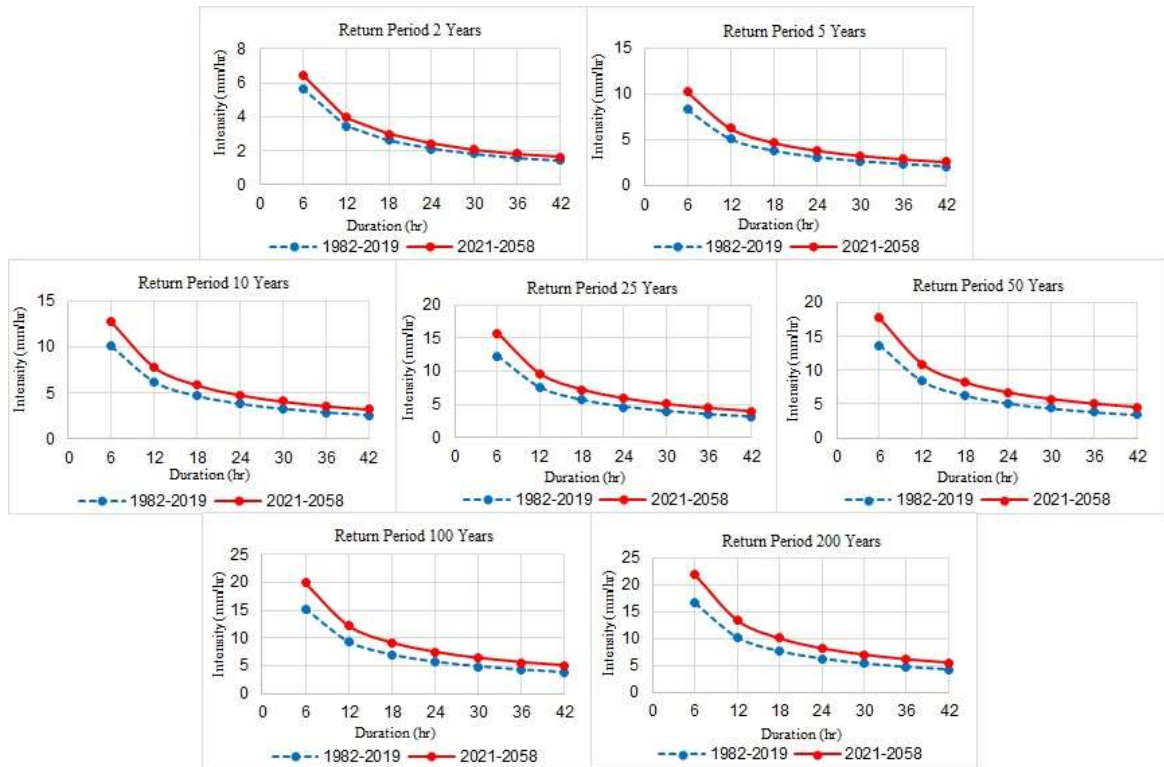
## 3. Results and discussion

To detect changes in rainfall intensity at different continuities in the past (1982 to 2019) and the future (2021 to 2058), all return periods were compared. Fig. 1 and 2 show a comparison of the curves. According to Fig. 1, under the RCP4.5 scenario, the maximum rainfall intensity has increased in all return periods; That is, the curves are shifted upwards. Under the RCP8.5 scenario (Fig. 2), except for the return period of 2 years, when the maximum precipitation intensity decreased, it increased in the rest of the return period.

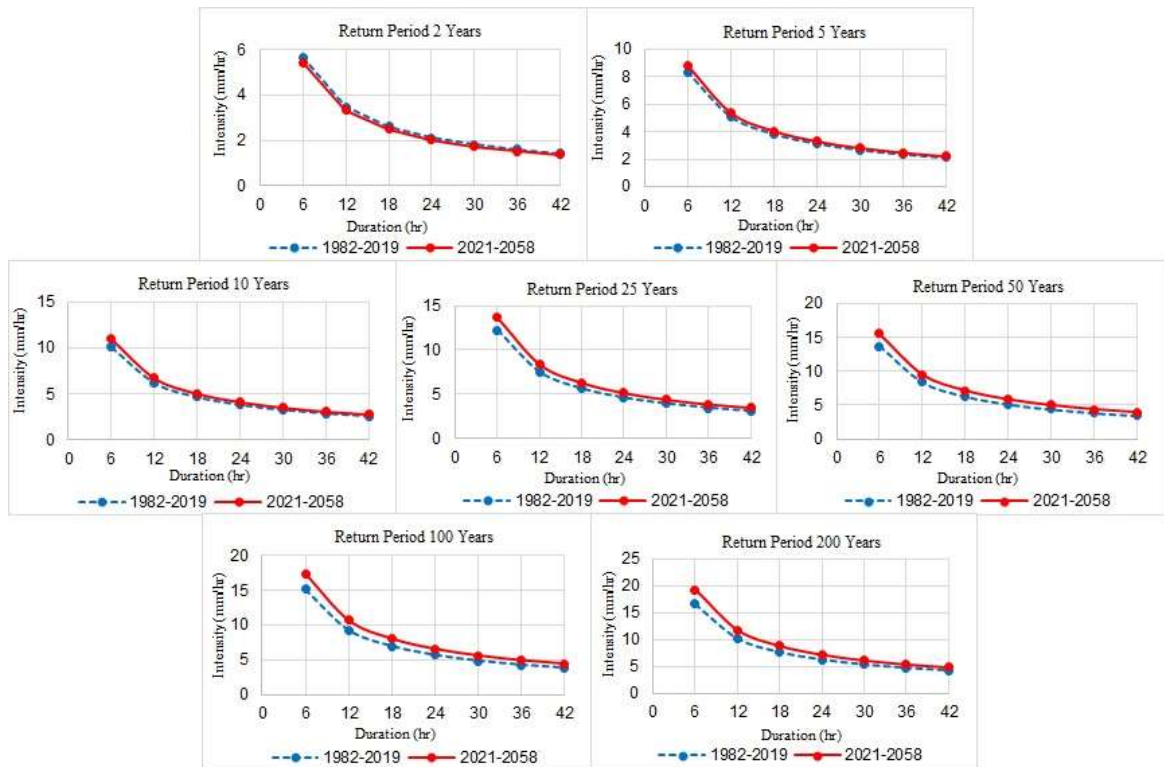
---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: hodaboolouki@gmail.com (Hoda Bolouki), fazeli@yu.ac.ir (Mehdi Fazeli), msharifzadeh@yu.ac.ir (Mehdi Sharifzadeh).



**Fig. 1.** Comparison of IDF curves related to historical and future period (generating future data with LARS-WG model under RCP4.5 scenario) in different return periods, Bushehr station



**Fig. 2.** Comparison of IDF curves related to historical and future period (generating future data with LARS-WG model under RCP8.5 scenario) in different return periods, Bushehr station

#### 4. Conclusions

In total, the mean curves increased by 26.20% under the RCP4.5 scenario and 9.48% under the RCP8.5 scenario (Table 1). Due to the increasing intensity of the curves in the future, structural flood management at Bushehr station could be considered. Also, the results of this study may be used to plan Bushehr regional water management and investigate the adaptation options to the consequences of climate change in the future.

**Table 1.** Percentage of changes in IDF curves in the future compared to the past

Model	LARS-WG	
	RCP4.5	RCP8.5
Station/ Scenario		
Bushehr	+ % 26.20	+ % 9.48

#### 5. References

- Basumatary V, Sil BS, "Generation of rainfall intensity-duration-frequency curves for the Barak River Basin", *Meteorology Hydrology and Water Management, Research and Operational Applications*, 2018, 6, 1-11.
- Mohymont B, Demarée GR, Faka DN, "Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa-comparison of techniques and results", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, 4 (3), 375-387.
- Nouri Gheidari MH, "Determine of Design Maximum Intensity of Precipitation by Combined Fractal Theory and Generalized Extreme Value Distribution", *Irrigation Sciences and Engineering*, 2012, 35 (2), 83-90 (in Persian).
- Srivastav RK, Schardong A, Simonovic SP, "Equidistance quantile matching method for updating IDF Curves under climate change", *Water resources management*, 2014, 28 (9), 2539-2562.
- Yousef LA, Taha BMJ, "Adaptation of water resources management to changing climate: the role of Intensity-Duration-Frequency curves", *International Journal of Environmental Science and Development*, 2015, 6(6), 478-483.
- Zamani Noori AR, "Derivating rainfall intensity- duration- frequency curves from daily data in Saveh hydro-meteorological station", *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2012, 1(2), 61-69 (in Persian).