

## Extraction of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves Under Climate Change, Case study: Isfahan Synoptic Station

H.R. Safavi<sup>1\*</sup>, Sh. Dadjou<sup>2</sup>, and G. Naeimi<sup>3</sup>

### Abstract

Many hydraulic structures are designed by using the design precipitation with return periods and duration based on concentration time. Therefore, and especially in regions without adequate rain gauge stations Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves play a significant role in the design of dimensions and components of these structures. However, the precipitation patterns has changed in various regions of the world following climate change as a consequence of the increasing human activities. Therefore, the historical IDF curves are no longer reliable. In this study, IDF curves were developed for Isfahan meteorological synoptic station. Extraction of precipitation intensity with continuous short-term 24-hour precipitation has been done by using fractal theory. In the present study, extractions of the IDF curves were divided into three periods: the historical period (1967-1993), the present period (1994-2016), and the future period (2017-2035). It was perceived that precipitation intensity with short-term duration increased because of changes in the climatology and IDF curves are shifted upwards. In this study, to predict the daily precipitation weighted output 15 AOGCM models were used under the A2 emission scenario related to the Fourth Assessment Report (AR4) IPCC, as the most reliable tool. Results showed that the predicted IDF for future (2017-2035) will increase even over 52 percent related to past IDF (1967-1993) in this region.

**Keywords:** Climate Change, Intensity-Duration-Frequency Curves, Fractal Theory, Maximum Annual Precipitation Intensity, Isfahan Synoptic Station.

Received: December 14, 2018

Accepted: March 31, 2019

## استخراج منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) در شرایط تغییر اقلیم، مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک اصفهان

حمیدرضا صفوی<sup>۱\*</sup>، شهاب‌الدین دادجو<sup>۲</sup> و گلنار نعیمی<sup>۳</sup>

### چکیده

بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی با استفاده از شدت بارش‌های طراحی با دوره‌ی بازگشت و زمان تداوم مشخص طراحی می‌شوند، لذا منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی (IDF) نقش اساسی در طراحی ابعاد و اجزای این سیستم‌ها دارند. این منحنی‌ها با استفاده از داده‌های مربوط به رگبارهای تاریخی ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی استخراج می‌شوند. از طرف دیگر با توجه به پدیده‌ی تغییر اقلیم که پیامد رشد روزافزون فعالیت‌های انسانی است، الگوهای بارش در مناطق مختلف جهان تغییر کرده و لذا نیاز به اصلاح منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در شرایط جدید و پیش‌یابی برای آینده می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از تئوری فرکتال که مبتنی بر نوعی نظم در بی‌نظمی است، اقدام به بررسی تغییرات منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در ایستگاه سینوپتیک اصفهان شد. منحنی‌های در سه دوره زمانی به صورت دوره تاریخی (۱۹۶۷-۱۹۹۳)، دوره اخیر (۲۰۱۶-۱۹۹۴) و دوره آینده تحت شرایط تغییر اقلیم (۲۰۳۵-۲۰۱۷) استخراج و تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای شرایط آینده از خروجی وزن‌دهی شده ۱۵ مدل AOGCM تحت سناریو انتشار A2 مربوط در چهارمین گزارش ارزیابی IPCC استفاده شده است. در دوره اخیر و دوره پیش‌بینی به دلیل تشدید پدیده‌ی تغییر اقلیم، هر چند میانگین بارش‌ها کاهش یافته ولی شدت بارش‌های با تداوم کوتاه افزایش یافته و منحنی‌های IDF به سمت بالا جابجا گردیدند. این میزان افزایش به بیش از حدود ۵۲ درصد نسبت به داده‌های تاریخی هم می‌رسد.

**کلمات کلیدی:** تغییر اقلیم، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، تئوری فرکتال، تداوم بارش کوتاه‌مدت، ایستگاه سینوپتیک اصفهان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱/۱۱

1- Professor, Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: [hasafavi@cc.iut.ac.ir](mailto:hasafavi@cc.iut.ac.ir)

2- M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: [Shahab\\_dadjou@yahoo.com](mailto:Shahab_dadjou@yahoo.com)

3- M.Sc. Graduate, Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: [g.naeimi@cv.iut.ac.ir](mailto:g.naeimi@cv.iut.ac.ir)

\*- Corresponding Author

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.  
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان.  
۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

حداکثر در تداوم موردنظر، مقدار بارش در همان تداوم به ازای دوره‌ی بازگشت موردنظر محاسبه شود. این برآورد برای تداوم‌های مختلف انجام و در نهایت یک منحنی که عمدتاً به فرم نمایی کاهش‌ی نسبت زمان بارش است برازش داده می‌شود. این مراحل برای دوره بازگشت‌های مختلف تکرار و دسته منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بدین ترتیب استخراج می‌گردند.

روش‌های متداول استخراج منحنی‌های IDF به ویژه با داده‌های محدود دارای تعداد پارامترهای زیادی بوده که باعث عدم اعتمادپذیری می‌شود، از این رو محققان معادلات تجربی را برای شدت-مدت-فراوانی پیشنهاد کرده‌اند (Cheng et al., 2001). Bell (1969) رابطه‌ای تجربی برای محدوده‌ی بازگشت ۲ تا ۱۰۰ سال و تداوم‌های مختلف بر اساس داده‌های ثبت شده در آمریکا به دست آورد. Chen (1983) بر اساس اطلاعات میان‌یابی شده شیکاگو، رابطه‌ای تجربی با خطای برآورد ۸ درصدی را پیشنهاد کرد. یکی دیگر از موانع استخراج این منحنی‌ها، کوتاه بودن طول دوره‌ی آماری داده‌های بارش یا عدم وجود آن در تداوم‌های مختلف به دلیل عدم وجود ایستگاه باران‌سنجی است. در این شرایط، استخراج شدت بارش‌های با تداوم کوتاه با استفاده از بارندگی‌های ۲۴ ساعته پیشنهاد شده است (Schaefer, 1990). همچنین در طی بیست سال گذشته برای مناطقی که ایستگاه باران‌سنجی نداشته‌اند، از روش‌های مبتنی بر تئوری‌های آمار و احتمال جهت استخراج مناطق همگن استفاده شده است (Chen et al., 2011). منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در شهر ساسکاچوان در کانادا، تحت شرایط تغییر اقلیم (با تعریف سه سناریو اقلیمی A1B، A2 B1)، داده‌های روزانه بارش و ریزمقیاس<sup>۲</sup> نمودن آن‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۳</sup> استخراج شده‌اند (Hassanzadeh et al., 2014). بر اساس مطالعات صورت گرفته، برای به‌روزرسانی منحنی‌های IDF مستخرجه از داده‌های تاریخی تحت شرایط تغییر اقلیم از روشی به نام تطبیق چندک با فواصل مساوی<sup>۴</sup> استفاده شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به روش‌های دیگر در این است که علاوه بر استفاده از ریزمقیاس نمایی فضایی/جداسازی در دوره‌ی پایه، شامل تغییرات ویژگی‌های توزیع مدل GCM بین دوره‌ی پایه و دوره‌ی طرح بوده و البته روشی ساده با محاسبات کارآمد است. این روش دارای دو مرحله اصلی شامل ریزمقیاس کردن بارش حداکثر روزانه از داده‌های GCM به هریک از زمان‌های کوتاه‌مدت (زیر روزانه<sup>۵</sup>) در ایستگاه موردنظر و سپس توزیع صریح تغییرات در داده‌های GCM بین دوره‌ی پایه<sup>۶</sup> و دوره‌ی آینده<sup>۷</sup> (ریزمقیاس نمایی زمانی<sup>۸</sup>) است (Srivastav et al., 2014). Simonovic et al. (2016) از IDF-CC به‌عنوان یک ابزار مبتنی بر وب برای استخراج منحنی‌های IDF در شرایط تغییر اقلیم استفاده

تغییرات اقلیمی ایجاد شده در اثر فعالیت‌های بشری و به دنبال آن افزایش گازهای گلخانه‌ای باعث تغییر دما و نیز بارش در اغلب مناطق جهان شده است. براین اساس تغییرات ثانویه‌ای در پوشش گیاهی مناطق، تشدید بیابانزایی، تغییر در مناطق کشاورزی و الگوهای کشت، میزان روانابها، تغذیه منابع آب زیرزمینی، آب شدن یخ‌های قطبی و بالا آمدن سطح آب دریاها و به ویژه تغییر در الگوهای بارش شده که امروزه مورد توجه محققان و مدیران قرار گرفته است. این تغییرات در تشدید وقایع حدی هیدرولوژیکی نظیر خشکسالی‌ها و سیلابها مؤثر بوده بطوریکه در دهه‌های اخیر رشد فزاینده این وقایع هم به لحاظ وسعت مکانی و هم تکرار زمانی را به همراه داشته است. دو دسته راهکار اساسی در مواجهه با این تغییرات وجود دارد که مشتمل بر مقابله و سازگاری می‌باشند. در این میان توجه به تغییرات بارشهای حداکثری می‌تواند در طراحی بسیاری از تأسیسات زیربنایی مورد توجه قرار گیرد. بسیاری از تأسیسات هیدرولوژیکی نظیر سیل بندها، آبگذر جاده‌ها، حوضچه‌های ذخیره و نگهداشت سیلاب و به‌ویژه سیستم‌های جمع‌آوری و دفع آب‌های سطحی شهری با استفاده از بارش‌های طراحی با دوره‌ی بازگشت و تداوم معادل زمان تمرکز حوضه آبریز مربوطه طراحی می‌شوند. از این رو منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی<sup>۱</sup> نقش اساسی در طراحی ابعاد و اجزای این سیستم‌ها در هر منطقه دارند. لذا در صورت دست بالا گرفتن شدت بارش طراحی، هزینه‌های اضافی در اجرای تأسیسات متوجه طرح خواهد شد و در حالت عکس آن، ظرفیت سیستم در آینده پاسخگو نخواهد بود و احتمال بروز خسارت‌های مالی و جانی افزایش خواهد یافت. براین اساس استفاده از منحنی‌های بدست آمده از داده‌های تاریخی و بدون اعمال تغییرات اقلیمی نمی‌تواند درجه‌ی اطمینان کافی را در طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی برآورده سازد.

از دهه ۱۹۳۰ روابط متفاوتی برای استخراج منحنی‌های IDF جهت پیش‌بینی شدت بارندگی با زمان‌های تداوم مختلف در آینده در جهت تعیین کاهش ریسک و بالابردن اطمینان طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی برای مناطق مختلف جهان ارائه شده است (Bernard, 1932; Smithers and Schulze, 2001).

برای استخراج منحنی‌های IDF به روش متداول لازم است در ابتدا داده‌های حداکثر بارش با تداوم‌های مختلف زمانی (D)، از روی آمار ثبت‌شده استخراج و در مرحله‌ی بعد در تداومی معین، یک توزیع احتمال برازش داده و نکویی آن با آزمون‌های آماری کنترل گردد. سپس با استفاده از توزیع احتمالاتی برازش داده‌شده بر روی داده‌های

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- تئوری‌های آشوب و فرکتال

بی‌نظمی و آشوب نوعی بی‌نظمی منظم یا نظم در بی‌نظمی تعریف شده است، به عبارتی دیگر، آشوب به دلیل نتایج غیرقابل پیش‌بینی بی‌نظمی داشته و به واسطه‌ی نظم از نوعی قطعیت برخوردار است (Hayles, 1989). طبق نظر (Adams and Russ, 1992) از آشفتگی زندگی زاییده می‌شود درحالی‌که از نظم عادت به وجود می‌آید و البته بی‌نظمی یک مفهوم ریاضی محسوب می‌شود که قطعیت آن بر اثر عوامل درونی است.

واژه فرکتال در سال ۱۹۷۶ توسط ریاضیدان فرانسوی به نام بنوئیت مندلبرات<sup>۱۰</sup> وارد دنیای ریاضیات شد. فرکتال ساختاری هندسی متشکل از اجزایی است که با بزرگ کردن هر یک به نسبت معین، ساختار اولیه به دست می‌آید؛ در حقیقت هر جزء همانند کل است. این ساختارها برخلاف اشکال هندسی اقلیدسی به هیچ‌وجه منظم نبوده و میزان بی‌نظمی در آن‌ها در مقیاس‌های مختلف یکسان است به طوری‌که جسم از دور و نزدیک یکسان دیده می‌شود یا به تعبیری دیگر خود مشابه است (Mandelbrot, 1982).

از جمله نمونه‌های بارز کاربرد تئوری فرکتال در علم هیدرولوژی می‌توان به هیتوگراف بارش و تغییرات زمانی و مکانی بارش و رواناب اشاره نمود (Burlando and Rosso, 1996). در صورتی که در پدیده‌هایی مثل بارش و سیلاب برخی از خصوصیات آماری با تغییر مقیاس تغییر نکنند، پدیده‌ی موردنظر از حیث مقیاس تغییرناپذیر یا ساده<sup>۱۱</sup> بوده و به این حالت مونوفرکتال<sup>۱۲</sup> گفته می‌شود. اگر شکل یا شیء موردنظر دارای خصوصیت عدم تغییرپذیری باشد، تنها با یک بعد قابل توصیف است، در غیر این صورت لازم است برای توصیف آن از چند بعد استفاده شود که به این حالت چند مقیاسی<sup>۱۳</sup> یا مالتی فرکتال<sup>۱۴</sup> گفته می‌شود (Nouri Ghidari, 2012). در هیدرولوژی از خصوصیت عدم تغییرپذیری مقیاسی و یا چند مقیاسی برای انتقال داده‌ها از یک مقیاس به مقیاس دیگر و یا از یک حوضه به حوضه دیگر استفاده می‌شود (Gupta and Waymire, 1990). با مقایسه‌ی سری زمانی بارش مشاهداتی با سری زمانی بارش شبیه‌سازی شده با مدل فرکتال، می‌توان نتیجه گرفت که یک مدل فرکتال به خوبی قادر است با خصوصیات آماری داده‌های مشاهداتی مطابقت کند (Deidda, 2000). در مطالعاتی دیگر از جمله (Bara et al., 2009)، خصوصیات فرکتالی مقادیر حدی بارش بررسی و خاصیت عدم تغییرپذیری در داده‌های حدی تأیید شده است. (Molnar and Burlando, 2005) از مدل فرکتال برای داده‌های ایستگاه باران‌سنجی زوریخ (۱۹۹۸-

کردند که به کمک آن در بیشتر ایستگاه‌های بارندگی محلی کانادا، پارامتر تغییر اقلیم بلافاصله بر منحنی‌ها وارد می‌شود. (Seyed Kaboli, 2016) به بررسی عدم قطعیت مقادیر شدت- فراوانی بارش‌های حداکثر در اثر تغییرات اقلیمی در استان خراسان رضوی پرداخت و به این نتیجه رسید که تحت سناریو A1B در آینده نزدیک شدت بارش‌ها به ویژه در نواحی شمالی استان افزایش خواهد یافت. (Sarhadi and Soulis, 2017) بیان نمودند که در شرایط محیطی متغیر برای حفظ قابلیت اطمینان در طراحی زیرساخت‌ها، لازم است منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی که با زمان تغییر می‌کنند جایگزین منحنی‌های ثابت قبلی شوند. همچنین در محل دریاچه‌های بزرگ جهت واردکردن تأثیر شرایط مختلف ناپایدار و پیچیده بر وقوع بارش‌های حدی، یک چارچوب متفاوت ریسک را با استفاده از روش مونت کارلو زنجیره مارکف باینز<sup>۱۵</sup> معرفی کردند. (Kaboosi and Kordjazi, 2017) به بررسی تغییرات اقلیمی تحت سناریو A2 بر متغیرهای هواشناسی در استان گلستان پرداختند و افزایش بارش سالیانه را در آینده نزدیک پیش‌بینی نمودند. (Ragno et al., 2018) چارچوبی جهت ارزیابی انعطاف‌پذیری زیرساخت‌ها و خطر عدم قطعیت‌ها به ویژه در محیط آب و هوایی گرم به دلیل اهمیت منحنی‌های IDF در طراحی زیرساخت‌ها و ارزیابی ریسک پیشنهاد کردند. در این مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر پایه‌ی بزرگی و فراوانی بارش‌های حدی با استفاده از داده‌های تاریخی اصلاح شده و در چند مدل پیش‌بینی بارش‌های حدی نشان داده شد که به ویژه در مناطق پرجمعیت در ایالات متحده آمریکا ممکن است رخ داده‌های بارش حدی از ۲۰ درصد تا دو برابر بیشتر نسبت به رکوردهای تاریخی را تجربه کنند.

لذا با توجه به تأثیر پدیده‌ی تغییر اقلیم بر مشخصات بارشها و به ویژه منحنی‌های IDF، و از طرف دیگر کوتاه بودن طول دوره‌ی آماری و داده‌های حداکثر بارندگی در ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در کشور ایران، نیاز به استخراج این منحنی‌ها در شرایط تغییر اقلیم از الزامات طراحی می‌باشد. براین اساس در این مقاله، ضمن اهمیت موضوع در ابتدا منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی در ایستگاه سینوپتیک اصفهان با استفاده از روش‌های توزیع آماری و داده‌های بارش در تداوم‌های کوتاه مدت بازسازی و سپس با استفاده از داده‌های روزانه (۲۴ ساعته) و تئوری فرکتال منحنی‌ها برای سه دوره‌ی زمانی به صورت مجزا استخراج شدند. در نهایت با استفاده از پیش‌بینی تغییرات بارش در آینده (۲۰۳۵-۲۰۱۷) در سناریوی اقلیمی A2 و با استفاده از وزن‌دهی ۱۵ مدل اقلیمی اقدام به استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی با استفاده از تئوری فرکتال شد و با منحنی‌های موجود مورد مقایسه قرار گرفت.

$$E(I_d) = \frac{E(I_D)}{D^n} d^n \quad (4)$$

$$E(I_d^2) = \frac{E(I_D^2)}{D^{2n}} d^{2n} \quad (5)$$

$$\text{Var}(I_d) = E(I_d^2) - E^2(I_d) \Rightarrow \text{Var}(I_d) = \frac{\text{Var}(I_D)}{D^{2n}} d^{2n} \quad (6)$$

در روابط (4) تا (6)،  $E(I_d)$  و  $\text{Var}(I_d)$  به ترتیب مقدار میانگین و واریانس شدت بارش با تداوم  $d$  است.

برای تحلیل فراوانی داده‌ها از روش پارامترهای فراوانی و برازش تابع توزیع احتمالاتی که توسط چائو<sup>۱۶</sup> پیشنهاد گردیده است، استفاده می‌شود (Safavi, 2014):

$$I_{d,T} = E(I_d) + K_T \sqrt{\text{Var}(I_d)} \quad (7)$$

$I_{d,T}$  شدت بارش است با تداوم  $d$  و دوره بازگشت  $T$ ،  $K_T$  عامل فراوانی<sup>۱۷</sup> بوده که تابع دوره بازگشت  $T$  و نوع توزیع احتمالاتی است. لذا رابطه زیر با جایگزینی روابط ۴ و ۶ در رابطه ۷ بدست خواهد آمد:

$$I_{d,T} = \frac{E(I_D)}{D^n} d^n + K_T \sqrt{\frac{\text{Var}(I_D)}{D^{2n}} d^{2n}} \Rightarrow I_{d,T} = \frac{E(I_D)}{D^n} (1 + C_v K_T) d^n \quad (8)$$

$C_v$  ضریب تغییرات بارش حداکثر سالانه در تداوم  $D$  است.

با توجه به اینکه داده‌های بارش روزانه (۲۴ ساعته) با دقت قابل قبولی در دسترس است، بهتر است  $D$  برابر ۲۴ ساعت فرض شود؛ آنگاه رابطه ۸ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$I_{d,T} = \frac{E(I_{24})}{24^n} (1 + C_v K_T) d^n \quad (9)$$

$C_v$  ضریب تغییرات بارش حداکثر سالانه با تداوم ۲۴ ساعته،  $d$  تداوم بارش برحسب ساعت  $I_{d,T}$  (hr)، شدت بارش در تداوم  $d$  و دوره بازگشت  $T$  (mm/hr)، میانگین شدت حداکثر بارش روزانه (mm/hr) است. رابطه ۹ یا رابطه فرکتال نتیجه‌ی تئوری عدم تغییرپذیری مقیاس زمانی بارش بوده و با استفاده از آن می‌توان منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی را از داده‌های روزانه بارش استخراج نمود.

### ۲-۲-۱- گشتاورهای توزیع‌های آماری و توابع توزیع احتمال

فراوانی یا احتمال یک رخداد تصادفی را می‌توان به‌عنوان جرم در نظر گرفته و گشتاورهای مختلف آن را به دست آورد. گشتاور  $r$ م حول مبدأ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_r = \sum_{i=1}^n f(x_i) x_i^r \quad (10)$$

در این رابطه  $n$  تعداد سال داده آماری،  $r$  مرتبه گشتاور،  $f(x_i)$  تابع توزیع (PDF) و  $x_i$  متغیر تصادفی (داده‌های بارش حداکثر) است.

(۱۹۷۹) در یک دوره‌ی ۲۰ ساله استفاده کردند و در پایان قابلیت به‌کارگیری مدل فرکتال جهت استخراج منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در مناطق کوهستانی را تأیید کردند.

### ۲-۲- استخراج فرمول‌های فرکتال

متغیر تصادفی  $I_d$  که نشان‌دهنده ماکزیمم شدت بارش با تداوم زمانی  $d$  است، به صورت زیر تعریف می‌شود (Burlando and Rosso, 1996):

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

در این رابطه،  $x(\xi)$  تابع پیوسته شدت بارش و  $d$  تداوم بارش است. متغیر تصادفی  $I_d$  به‌عنوان ماکزیمم مقدار متوسط  $x(\xi)$  در عرض  $d$  تعریف می‌شود که همان حداکثر شدت سالانه بارش در تداوم  $d$  است.

(Menabde et al. 1999) بر اساس آنالیز فرکتال‌ها دریافتند که متغیرهای تصادفی  $I_d$  و  $I_D$  که به ترتیب حداکثر شدت بارش سالانه در تداوم‌های  $d$  و  $D$  است، دارای خصوصیات مقیاسی به صورت رابطه‌ی زیر است:

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

که  $n$  توان مقیاس<sup>۱۵</sup> در رابطه فوق است. این رابطه نشان می‌دهد که توزیع فراوانی بارش در تداوم‌های مختلف دارای توزیع فراوانی نسبتاً یکسانی است. Yu et al. (2004) بیان کردند که اگر بر اساس خاصیت مونوفرکتالی یا عدم تغییرپذیری مقیاس داده‌ها از طرفین رابطه ۲ گشتاور مرتبه  $q$  گرفته شود، خواهیم داشت:

$$E(I_d^q) = \left(\frac{d}{D}\right)^{K(q)} E(I_D^q) = \frac{E(I_D^q)}{D^{K(q)}} d^{K(q)} \quad (3)$$

و در ادامه اگر از دو طرف رابطه ۳ لگاریتم گرفته شود،  $k(q)$  به ازای  $q$  معین همان شیب خط رگرسیونی  $\log E(I_d^q)$  در برابر لگاریتم تداوم بارش،  $\log d$ ، خواهد بود.

تغییرات  $k(q)$  نسبت به  $q$  نشان‌دهنده‌ی خصوصیات مقیاس زمانی بارش است. به طوری که اگر تغییرات  $k(q)$  نسبت به  $q$  ثابت باشد،  $k(q)$  تابع خطی از  $q$  بوده و نشان‌دهنده‌ی خاصیت مونوفرکتالی بارش است. چنانچه تغییرات  $k(q)$  نسبت به  $q$  ثابت نباشد،  $k(q)$  تابع غیرخطی از  $q$  بوده و دلالت بر مالتی فرکتال بودن بارش خواهد داشت (Gupta and Waymire, 1990).

(Menabde et al. 1999) با بررسی تئوری اشکال خود متشابه در حالت عدم تغییرپذیری مقیاس از رابطه ۳، رابطه‌ی میانگین و واریانس بارش در دو تداوم مختلف را به صورت زیر ارائه کردند:

(۱۹۹۳-۱۹۶۷)، دوره‌ی اخیر (۲۰۱۶-۱۹۹۴) و دوره‌ی پیش‌بینی (۲۰۳۵-۲۰۱۷) پرداخته شده است.

**۳-۱- دوره‌ی تاریخی (۱۹۹۳-۱۹۶۷)**

با توجه به داده‌های ثبت شده در ایستگاه هواشناسی اصفهان در طول دوره تاریخی ۱۹۶۷ تا ۱۹۹۳ که پایه استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی موجود در سازمان هواشناسی کشور است و با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit، توابع احتمالاتی حداکثر شدت‌های بارندگی برای تداوم‌های مختلف (۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۶۰، ۵۴۰ و ۱۴۴۰ دقیقه‌ای) برازش داده شد و آزمون نیکویی برازش بر روی آنها انجام شد (جدول ۱). سه آزمون کولمگروف-اسمیرنوف، اندرسون-دارلینگ و کی دو بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق با استناد به تحقیقات قبلی که استفاده از نتایج آزمون کی دو برای داده‌های حداکثر بارش را توصیه نموده‌اند، از این آزمون جهت بررسی نیکویی برازش استفاده شده است (Burlando and Rosso, 1996; García-Marín et al., 2013).

سپس با استفاده از رابطه‌ی (۱۰) گشتاورهای مراتب ۱ تا ۵ مطابق مقادیر مندرج در جدول ۲ محاسبه شد.

**۳-۱-۱- بررسی رفتار فرکتالی داده‌ها**

برای بررسی رفتار فرکتالی داده‌ها، گشتاور وزنی داده‌های حداکثر شدت بارش با تداوم‌های مختلف که مطابق جدول ۲ محاسبه شده بود، در یک مختصات دو لگاریتمی به صورت شکل ۱ ترسیم شد.

در نظریه آمار و احتمال، تابع توزیع احتمال<sup>۱۸</sup> بیانگر احتمال هر یک از مقادیر متغیر تصادفی ناپیوسته و یا احتمال قرار گرفتن متغیر پیوسته در یک بازه مشخص است. توزیع تجمعی احتمال یک متغیر تصادفی مطابق رابطه‌ی زیر تابعی از دامنه‌ی آن متغیر بر بازه‌ی [۰،۱] بوده که احتمال رخ دادن پیشامدهایی با مقدار عددی کمتر از آن را نمایش می‌دهد (Kolmogorov, 2018).

$$F_X(x) = \Pr[X \leq x] \quad (11)$$

یک توزیع احتمال، یک احتمال به هر زیرمجموعه‌ی قابل اندازه‌گیری از نتایج ممکن از یک آزمایش تصادفی، بررسی و یا روش استنباط آماری اختصاص می‌دهد (Walck, 1996).

**۳- مطالعه موردی، ایستگاه سینوپتیک اصفهان**

ایستگاه سینوپتیک اصفهان با کد ۴۰۸۰۲ در موقعیت جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و ۵۱ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۵۵۱/۹ متر از سطح دریاهای آزاد دارای داده‌های بارش ثبت شده از سال ۱۹۶۷ تا کنون می‌باشد، لذا از داده‌های این ایستگاه برای استخراج منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی در منطقه اصفهان استفاده شده است. اقلیم این منطقه براساس طبقه‌بندی دومارتن از نوع فراخشک سرد و تقسیم‌بندی آمبرژه از نوع خشک سرد است. میانگین تعداد روزهای بارانی در این ایستگاه ۴۰ روز در سال است که ۱۲ روز آن در پائیز، ۱۷ روز در زمستان، ۱۰ روز در بهار و ۱ روز در تابستان است. این منطقه بطور متوسط دارای ۶ روز برفی در طول سال می‌باشد. در این تحقیق به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی در سه دوره‌ی زمانی مجزا یعنی دوره‌ی تاریخی

**Table 1- Ranking goodness of fit for different distribution for the 24 hours rainfall**

**جدول ۱- رتبه‌بندی آزمون‌های نیکویی برازش مختلف برای داده‌های بارندگی ۲۴ ساعته**

Number	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
1	Gumbel Max	0.13455	4	0.51091	6	0.98963	1
2	Gumbel Min	0.2683	10	3.3433	10	3.6207	7
3	Log-Pearson type 3	0.12551	3	0.33018	1	3.3306	6
4	Lognormal	0.13699	6	0.4241	5	3.1805	5
5	Lognormal (3P)	0.11672	1	0.33246	2	5.6984	10
6	Normal	0.20316	9	1.1942	9	2.998	2
7	Pearson 5	0.13475	5	0.36026	4	5.2337	8
8	Pearson 5 (3P)	0.12524	2	0.35591	3	5.6086	9
9	Log-Gamma			No Fit			

**Table 2- Calculation of the first to the fifth moment for different durations of rainfall**

جدول ۲- محاسبه گشتاورهای مراتب اول تا پنجم برای بارشهای با زمان تداوم مختلف

Duration (min)	10	30	60	120	180	240	360	540	1440
Moment									
Q <sub>1</sub>	16.43	8.55	6.41	4.30	3.31	2.81	2.17	1.69	0.81
Q <sub>2</sub>	370.39	19.57	14.53	92.02	81.65	59.38	48.99	42.06	19.24
Q <sub>3</sub>	9892.51	714.45	48.22	35.24	23.79	19.76	10.35	91.58	29.22
Q <sub>4</sub>	302450	107313	980.52	692.12	539.26	417.45	310.90	260.48	149.00
Q <sub>5</sub>	10060737	4232902	2925854	2135292	1727691	1421535	1030589	8338630	495501

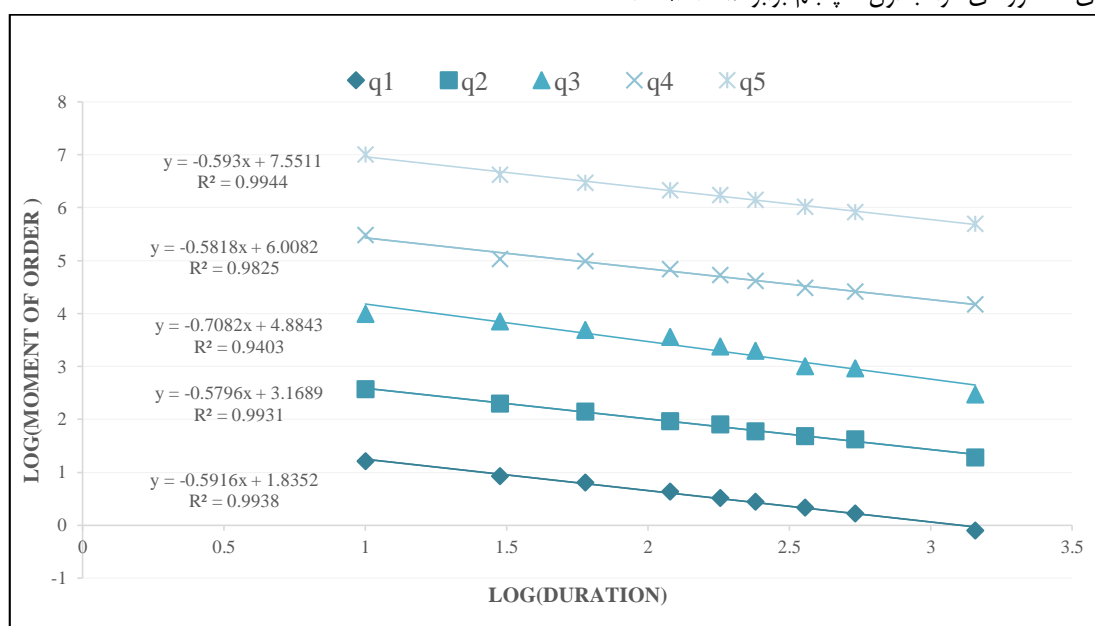
همانگونه که در شکل ۱ مشخص است، در مختصات دو لگاریتمی گشتاورهای وزنی با مرتبه های مختلف نسبت به تداوم بارش به طور تقریبی موازی شده اند و این موضوع نشان می دهد داده های بارش ایستگاه سینوپتیک اصفهان از خصوصیات فرکتالی برخوردار هستند. با توجه به ماهیت توانی تئوری فرکتال (رابطه ۲)، خطی بودن داده ها در شکل ۱ نشان دهنده ی مقیاس ساده آن هاست یا به عبارتی دیگر، داده ها دارای عدم تغییرپذیری مقیاسی هستند و لذا می توان از روابط ۳ تا ۹ استفاده کرد.

مطابق شکل ۱، شیب خطوط برازش داده شده برای گشتاور مرتبه پنجم برابر ۰/۵۹۳- با ضریب تطابق ۰/۹۹۴۴، برای گشتاور مرتبه چهارم برابر ۰/۵۸۱۸- با ضریب تطابق ۰/۹۸۲۵، برای گشتاور مرتبه سوم برابر ۰/۷۰۸۲- با ضریب تطابق ۰/۹۴۰۳، برای گشتاور مرتبه دوم برابر ۰/۵۷۹۶- با ضریب تطابق ۰/۹۹۳۱ و نهایتاً برای گشتاور مرتبه اول برابر ۰/۵۹۱۶- با ضریب تطابق ۰/۹۹۳۸ است. بنابراین شیب میانگین خطوط برای گشتاورهای مراتب اول تا پنجم برابر ۰/۶۱۰۸۴- است.

همان طور که در رابطه فرکتال آورده شده است، به پارامتری تحت عنوان عامل فراوانی (K<sub>T</sub>) که مربوط به توزیع احتمالاتی برازش داده شده برای آن تداوم خاص بوده نیاز است. در رابطه فرکتال، E(I<sub>24</sub>) میانگین بارش داده های بارش ۲۴ ساعته و n همان توان مقیاس که محاسبه شد و C<sub>v</sub> ضریب تغییرات بارش ۲۴ ساعته، K<sub>T</sub> عامل فراوانی، d تداوم مورد نظر و I<sub>d</sub> شدت در همان تداوم مورد نظر است.

همان طور که در رابطه فرکتال آورده شده است، به پارامتری تحت عنوان عامل فراوانی (K<sub>T</sub>) که مربوط به توزیع احتمالاتی برازش داده شده برای آن تداوم خاص بوده نیاز است. در رابطه فرکتال، E(I<sub>24</sub>) میانگین بارش داده های بارش ۲۴ ساعته و n همان توان مقیاس که محاسبه شد و C<sub>v</sub> ضریب تغییرات بارش ۲۴ ساعته، K<sub>T</sub> عامل فراوانی، d تداوم مورد نظر و I<sub>d</sub> شدت در همان تداوم مورد نظر است.

همان طور که در رابطه فرکتال آورده شده است، به پارامتری تحت عنوان عامل فراوانی (K<sub>T</sub>) که مربوط به توزیع احتمالاتی برازش داده شده برای آن تداوم خاص بوده نیاز است. در رابطه فرکتال، E(I<sub>24</sub>) میانگین بارش داده های بارش ۲۴ ساعته و n همان توان مقیاس که محاسبه شد و C<sub>v</sub> ضریب تغییرات بارش ۲۴ ساعته، K<sub>T</sub> عامل فراوانی، d تداوم مورد نظر و I<sub>d</sub> شدت در همان تداوم مورد نظر است.



**Fig. 1- The weighted moment of maximum rainfall for different duration**

شکل ۱- گشتاور وزنی داده های حداکثر شدت بارش با تداوم های مختلف

لذا (Adams and Russ, 1992; García-Marín et al., 2013) میزان خطای محاسبه شده برای منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی استخراج شده مورد قبول است.

۳-۲- دوره اخیر (۲۰۱۶-۱۹۹۴)

در این دوره با استفاده از داده‌های حداکثر شدت بارش روزانه و روش فرکتال، شدت‌های حداکثر بارش در تداوم‌های کوتاه‌مدت به دست آمده که در جدول ۶ درج شده است. با استفاده از داده‌های جدول ۶ دسته منحنی‌های IDF مطابق شکل ۳ برای سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۶ ترسیم شده است.

۳-۳- دوره پیش‌بینی تحت شرایط تغییر اقلیم (۲۰۳۵-۲۰۱۷)

براساس تحقیقات قبلی انجام شده در بخش مطالعات بررسی تغییر اقلیم در طرح "مدیریت یکپارچه رودخانه زاینده‌رود" برای سناریوهای مختلف به روش وزن دهی، ۱۵ مدل AOGCM با داده‌های تاریخی در ایستگاه‌های مختلف هواشناسی در این حوضه و از جمله ایستگاه سینوپتیک اصفهان، سناریو انتشار A2 به دلیل نزدیک بوده به شرایط آینده منطقه انتخاب شد (Eslamian et al., 2017).

با توجه به اینکه داده‌های حداکثر شدت بارش با تداوم روزانه (۱۴۴۰ دقیقه‌ای)، از توزیع مقادیر حدی گامبل تبعیت نمودند، مقادیر ضریب فراوانی بر اساس دوره‌ی بازگشت و تعداد نمونه‌ها، از جدول ۳ به دست می‌آید (Safavi, 2014). تعداد نمونه‌ها ۲۶ سال، بنابراین با تقریب قابل قبولی از ردیف مربوط به ۲۵ نمونه استفاده شده است.

براین اساس حداکثر شدت بارش‌های با تداوم‌های مختلف مطابق جدول ۴ و شکل ۲ برای داده‌های تاریخی برای ایستگاه سینوپتیک اصفهان استخراج شده است.

همچنین برای مقایسه کمی نتایج به دست آمده از تئوری فرکتال با داده‌های تجربی، از روش تفاوت نسبی<sup>۱۹</sup> که به صورت زیر تعریف شده استفاده شد (Bara et al., 2009; Bell, 1969):

$$RD = \left| \frac{X - Y}{Y} \right| \times 100 \quad (12)$$

که در آن X مقدار شدت بارش به دست آمده از تئوری فرکتال و Y مقدار شدت بارش داده‌های تجربی است. بر این اساس در جدول ۵ خطای تئوری فرکتال با داده‌های تجربی درج شده است.

لازم به ذکر است که بر اساس تحقیقات قبلی، خطای تئوری فرکتال در حوزه‌های کاربردی مختلف از ۸/۵ تا ۱۶/۵ درصد گزارش شده است

Table 3- Coefficient of  $K_T$  in Gumble extreme value distribution  
جدول ۳- ضریب فراوانی  $K_T$  در توزیع مقادیر حدی گامبل

Return Period (year) Sample Number	2	5	10	20	25	50	100	1000
15	0.793	0.967	1.703	2.410	2.632	3.321	4.005	6.265
20	0.711	0.919	1.625	2.302	2.517	3.179	3.836	6.006
25	0.689	0.888	1.575	2.235	2.444	3.088	3.729	5.824
30	0.613	0.866	1.541	2.188	2.393	3.026	3.653	5.727
35	0.584	0.851	1.516	2.152	2.354	2.979	3.598	5.602
40	0.562	0.838	1.495	2.126	2.326	2.943	3.554	5.476

Table 4- The maximum rainfall for different short-term durations and return periods (1967-1993)  
جدول ۴- حداکثر شدت بارش در تداوم‌های کوتاه‌مدت برای دوره‌های بازگشت مختلف (۱۹۶۷-۱۹۹۳)

Duration (min) Return Period (year)	10	30	60	120	180	240	360	540
2	16.375	8.874	6.646	4.324	3.444	2.877	2.219	1.713
5	24.990	12.700	9.260	5.893	4.633	3.834	3.123	2.493
10	30.319	15.368	10.985	6.925	5.413	4.463	3.724	3.007
20	35.415	17.835	12.620	7.910	6.613	5.069	4.298	3.500
50	42.018	20.911	14.702	9.175	7.103	5.854	4.937	4.043
100	46.857	23.266	16.248	10.119	7.856	6.444	5.456	4.485

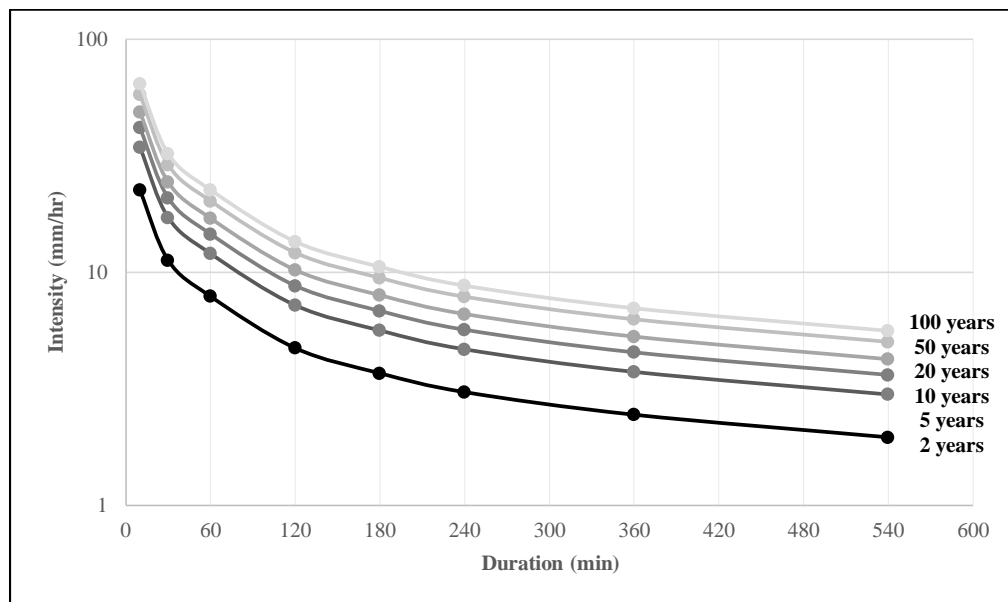


Fig. 2- The IDF curves based on statistical data of 1967 to 1993

شکل ۲- دسته منحنی‌های IDF بر اساس آمار سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۹۳

Table 5- Percentage of error in fractal theory

جدول ۵- درصد خطای تئوری فرکتال

Time (min)	10	30	60	120	180	240	360	540
Percentage of error	11.23	9.68	10.93	8.70	10	8.91	9.81	10.23

Table 6- The maximum intensity of precipitation for different return periods (1994-2016)

جدول ۶- حداکثر شدت بارش در تداوم‌های کوتاه‌مدت برای دوره‌های بازگشت مختلف (۱۹۹۴-۲۰۱۶)

Duration (min)	10	30	60	120	180	240	360	540
Return Period (year)								
2	22.507	11.262	7.883	4.730	3.689	3.062	2.450	1.96
5	34.371	17.223	12.031	7.219	5.361	4.637	3.739	2.991
10	41.709	20.818	14.596	8.758	6.831	5.670	4.536	3.629
20	48.827	34.357	17.050	10.230	7.980	6.623	5.289	4.239
50	57.707	28.898	20.229	12.137	9.467	7.858	6.286	5.029
100	64.497	32.226	22.558	13.535	10.558	8.762	7.010	5.608

۳-۴- مقایسه نتایج سه دوره به صورت کلی

برای مقایسه نتایج حاصل از سه دوره مختلف برای منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی استخراج شده، برای هر تداوم بارندگی، میزان درصد تغییرات هر دوره نسبت به دوره‌های دیگر محاسبه و از این درصد تغییرات، تغییرات منحنی‌های IDF به صورت میانگین برای دوره دوم به اول، دوره سوم به دوم و دوره سوم به اول محاسبه شد (جدول ۸).

بارشهای حداکثر ۲۴ ساعته پیش‌یابی شده در طی این دوره استخراج و همانند دو دوره‌ی قبل، در این دوره هم با استفاده روش فرکتال، شدت‌های حداکثر بارش در تداوم‌های کوتاه‌مدت استخراج شد.

لذا با استفاده از داده‌های جدول ۷، دسته منحنی‌های IDF برای سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۵ ترسیم شد (شکل ۴).



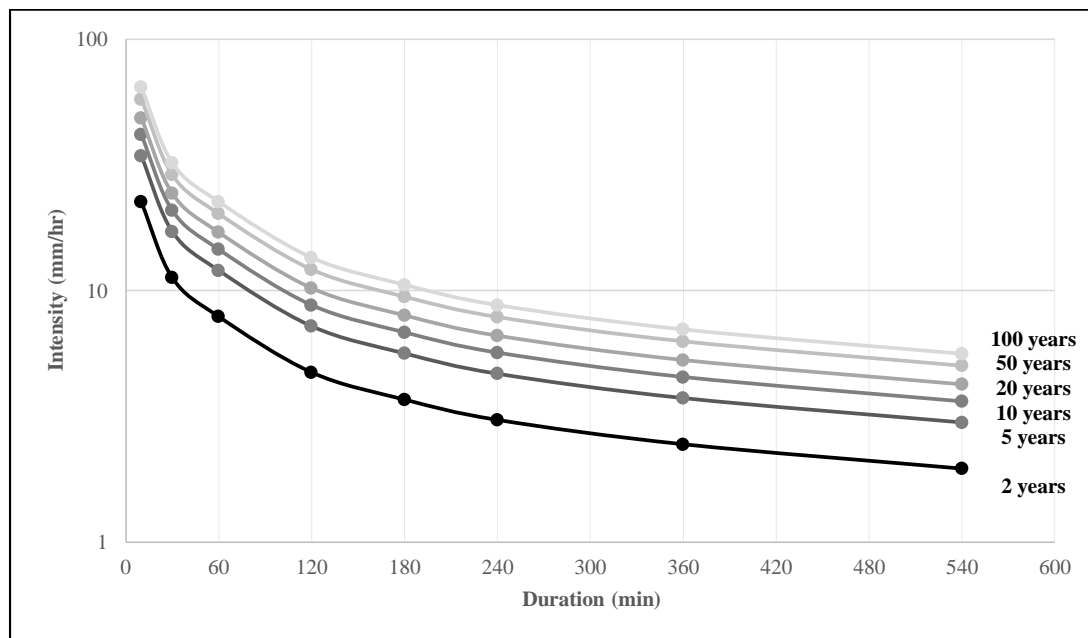


Fig. 3- The IDF curves based on statistical data of 1994 to 2016

شکل ۳- دسته منحنی‌های IDF برای سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۶

Table 7- The maximum precipitation for different short-term durations and return periods (2017-2035)  
جدول ۷- حداکثر شدت بارش در تداوم‌های کوتاه‌مدت برای دوره‌های بازگشت مختلف (۲۰۱۷-۲۰۳۵)

Duration (min)	10	30	60	120	180	240	360	540
Return Period (year)	10	30	60	120	180	240	360	540
2	25.002	14.264	10.390	6.333	4.912	3.976	3.264	2.612
5	38.186	21.756	15.864	9.672	7.503	6.075	4.961	3.994
10	46.291	26.400	19.249	11.737	9.105	7.373	6.201	4.848
20	54.072	30.834	22.478	13.712	10.637	8.614	7.035	5.665
50	64.155	36.581	26.682	16.271	12.623	10.222	8.349	6.723
100	71.543	40.792	29.756	18.146	14.079	11.401	9.312	7.500

لذا علی‌رغم کاهش میزان میانگین بارندگی‌های در آینده در این منطقه، افزایش شدت بارش‌های کوتاه مدت اتفاق خواهد افتاد.

Table 8- Quantitative comparison of the results for three time periods

جدول ۸- مقایسه کمی نتایج سه دوره زمانی

Ratio of variations in periods	Percent of changes
The second period to the first period	+28.1
The third period to the second period	+19.1
The third period to the first period	+52.3

به عبارتی دیگر، با توجه به پدیده تغییر اقلیم که در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ آهنگ تأثیر بیشتری بر پدیده‌های هیدرولوژیکی داشته است، باعث شده تغییرات زیادی بر شدت بارندگی‌های کوتاه مدت بگذارد و بطور میانگین منحنی‌های IDF را تا پایان سال ۲۰۱۷ به اندازه ۲۸٪ به سمت بالا جابجا (افزایش شدت) و پس از آن این افزایش شدت ادامه داشته اما با آهنگ کمتری (۱۹٪). بطور میانگین در دوره‌ی سوم، یعنی تا پایان سال ۲۰۳۵ میلادی، منحنی‌های IDF تا حدود ۵۲٪ نسبت به دوره‌ی اول (۱۹۹۳-۱۹۶۷) به سمت بالا جابجا می‌شوند و

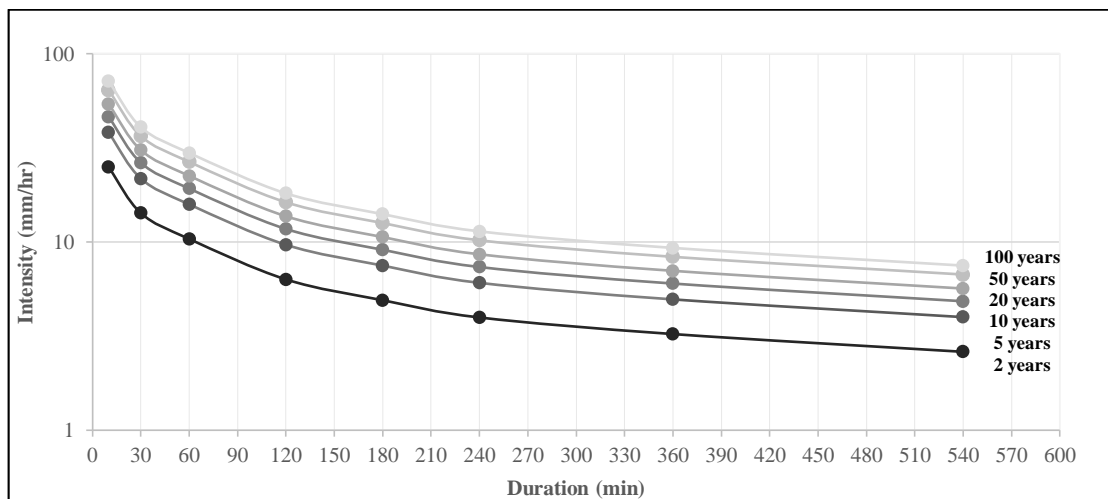


Fig. 4- The IDF curves based on projected data under climate change (2017 to 2035)  
 شکل ۴- دسته منحنی‌های IDF برای پیش‌یابی تحت اثرات تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۳۵

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

به دلیل به وجود آمدن پدیده تغییر اقلیم ناشی از فعالیت‌های انسانی، علی‌رغم کاهش میانگین بارندگی، شدت بارش‌های کوتاه‌مدت برای یک تداوم خاص در منطقه‌ی اصفهان افزایش داشته، به بیانی دیگر، زمان تداوم بارش‌های کوتاه‌مدت برای یک شدت خاص افزایش یافته است. بنابراین در صورتی لزوم طراحی و اجرای تأسیسات هیدرولیکی در این منطقه، در جهت کاهش ریسک و افزایش اطمینان لازم است از منحنی‌های IDF اصلاحی استفاده شود.

با توجه به نتایج بدست آمده لازم است برای تأسیسات هیدرولیکی نگهدارنده سیلاب، حجم مخازن بالاتری در نظر گرفت و برای تأسیسات هیدرولیکی انتقال سیلاب، ابعاد مقاطع بزرگ‌تر و یا دبی خروجی افزایش داده شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود از منحنی‌های IDF در شرایط تغییر اقلیم برای طراحی‌های آینده و نیز اصلاح تأسیسات آبی موجود استفاده شود.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Intensity-Duration-Frequency (IDF)
- 2- Downscaling
- 3- Genetic Programming
- 4- Equidistance Quantile Matching (EQM)
- 5- Sub-Daily
- 6- Baseline Period
- 7- Future Period
- 8- Temporal Downscaling
- 9- Bayesian Markov Chain Monte Carlo Techniques
- 10- Benoit Mandelbrot
- 11- Simple Scaling
- 12- Mono-Fractal
- 13- Multiscaling
- 14- Multifractal
- 15- Scaling Exponent
- 16- Chow
- 17- Frequency Factor
- 18- Probability Distribution Function (PDF)
- 19- Relative Difference

#### ۵- مراجع

- Adams HM, Russ JC (1992) Chaos in the classroom: exposing gifted elementary school children to chaos and fractals. *Journal of Science Education and Technology* 1(3):191-209
- Bara M, Kohnova S, Gaal L, Szolgay J, Hlavčova K (2009) Estimation of IDF curves of extreme rainfall by simple scaling in Slovakia. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 39(3):187-206
- Bell FC (1969) Generalized rainfall-duration-frequency relationships. *Journal of the Hydraulics Division* 95(1):311-328

بر این اساس از آنجا که پدیده تغییر اقلیم که در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰ آهنگ تأثیر بیشتری بر پدیده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی داشته، تغییرات زیادی بر شدت بارندگی‌های کوتاه‌مدت ایجاد کرده است. به طوری که منحنی‌های IDF تا پایان سال ۲۰۱۶ به طور میانگین ۲۸ درصد به سمت بالا جابجا (افزایش شدت) و پس از آن، با آهنگ کمتری (۱۹ درصد) این جابه‌جایی ادامه خواهد داشت به طوری که مطابق نتایج بدست‌آمده در دوره‌ی سوم (۲۰۱۷-۲۰۳۵)، نزدیک به ۵۲ درصد نسبت به دوره‌ی تاریخی (۱۹۶۷-۱۹۹۳) افزایش نشان می‌دهد.

- Mandelbrot BB (1982) The fractal geometry of nature, vol 1. WH freeman New York
- Molnar P, Burlando P (2005) Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by a simple random cascade model. *Atmospheric Research* 77(1-4):137-151
- Menabde M, Seed A, Pegram G (1999) A simple scaling model for extreme rainfall. *Water Resources Research* 35(1):335-339
- Nouri Ghidari MH (2012) Extraction of intensity-duration-frequency curves from daily rainfall data using fractal theory. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)* 26(3):716-726 (In Persian)
- Ragno E, AghaKouchak A, Love CA, Cheng L, Vahedifard F, Lima CHR (2018) Quantifying changes in future intensity-duration-frequency curves using multimodel ensemble simulations. *Water Resources Research* 54(3):1751-1764
- Safavi HR (2014) Engineering hydrology. 4th Edition, Arkan Danesh Press, 704p (In Persian)
- Sarhadi A, Soulis ED (2017) Time-varying extreme rainfall intensity-duration-frequency curves in a changing climate. *Geophysical Research Letters*
- Schaefer MG (1990) Regional analyses of precipitation annual maxima in Washington State. *Water Resources Research* 26(1):119-131
- Seyed Kaboli H (2016) Uncertainty of extreme rainfall intensity and frequency under future climate change impact: Khorasan-Razavi Province. *Iran-Water Resources Research*, 12(2):93-103 (In Persian)
- Simonovic SP, Schardong A, Sandink D, Srivastav R (2016) A web-based tool for the development of intensity duration frequency curves under changing climate. *Environmental Modelling & Software* 81:136-153
- Smithers J, Schulze R (2001) A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on L-moments. *Journal of Hydrology* 241(1-2):42-52
- Srivastav RK, Schardong A, Simonovic SP (2014) Equidistance quantile matching method for updating IDF curves under climate change. *Water Resources Management* 28(9):2539-2562
- Walck C (1996) Hand-book on statistical distributions for experimentalists.
- Yu P-S, Yang T-C, Lin C-S (2004) Regional rainfall intensity formulas based on scaling property of rainfall. *Journal of Hydrology* 295(1-4):108-123
- Bernard MM (1932) Formulas for rainfall intensities of long duration. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 96(1):592-606
- Burlando P, Rosso R (1996) Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation. *Journal of Hydrology* 187:45-64
- Chen Cl (1983) Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering* 109(12):1603-1621
- Chen L-H, Lin G-F, Hsu C-W (2011) Development of design hyetographs for ungauged sites using an approach combining PCA, SOM and kriging method. *Water Resources Management* 25(8):1995-2013
- Cheng K-S, Hueter I, Hsu E-C, Yeh H-C (2001) A scale-invariant Gauss-Markov model for design storm hydrographs. *Journal of the American Water Resources Association* 37(3):723-735
- Deidda R (2000) Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework. *Water Resources Research* 36(7):1779-1794
- Eslamian SS, Safavi HR, Goharian AR, Sajjadi M, Raghbi V, Zareian MJ (2017) Climate change impacts on some hydrological variables in the Zayandeh-Rud River Basin, Iran. *Reviving the Dying Giant* pp 201-217. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-54922-4\_13
- García-Marín A, Ayuso-Muñoz J, Jiménez-Hornero F, Estévez J (2013) Selecting the best IDF model by using the multifractal approach. *Hydrological Processes* 27(3):433-443
- Gupta VK, Waymire E (1990) Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *Journal of Geophysical Research* 95(D3):1999
- Hassanzadeh E, Nazemi A, Elshorbagy A (2014) Quantile-based downscaling of precipitation using genetic programming: application to IDF Curves in Saskatoon. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(5):943-955
- Hayles NK (1989) Chaos as orderly disorder: shifting ground in contemporary literature and science. *New Literary History* 20(2):305
- Kaboosi K, Kordjazi M (2017) Effect of climate change on meteorological parameters and drought in Golestan Province. *Iran-Water Resources Research* 13(3):205-213 (In Persian)
- Kolmogorov AN (2018) Foundations of the theory of probability: Second English edition. Courier Dover Publications