

## Uncertainty Analysis of IDF Curves Simulation Under Climate Change Scenarios Using a Weather Generator Model (Case Study: Tehran)

R. Habibnejad<sup>1</sup> and A. Shokoohi<sup>2\*</sup>

### Abstract

The main objective of this research is evaluating IDF curves variation in the future using the observed rainfall and the forecasted one by PRECIS, while focused on yielding the uncertainties of the forecast via employing the K-NN WG model under two historical and wet scenarios. The historical climate change scenario and the B2 emission scenario were used to generate the lower and upper-reliability bounds of the forecast, respectively. By applying the shuffling and perturbation mechanisms, those random data, which are not recorded in the observing period but will be probably happened in the future, were generated and the results were employed for developing the IDF curves of 2, 5, 10, 20, 50, and 100-year return periods. Comparing the two climate change scenarios and the base period IDFs reveal the increase in the intensity of the extreme short-duration rainfalls. Moreover, it was found that the maximum amount of rainfall for the duration of 10 minutes to 3 hours on average would have a difference of 26 to 31 percent under the historical and wet scenarios concerning the base period, respectively. This difference between the historical and wet scenario is limited to 4.8%. The small difference between the historical scenario, as the lower bound, and the wet one, as the upper bound of the probable storms in the future, firstly shows the accuracy of PRECIS in simulating rainfall in the study region; secondly, it shows the certain increase in the intensity of the design storms which matter in urban flood management.

**Keywords:** Climate Change, Uncertainty, IDF Curves Forecast, WG Model, PRECIS.

Received: March 10, 2020

Accepted: July 9, 2020

## تحلیل عدم قطعیت شبیه‌سازی منحنی‌های شدت مدت فراوانی در سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از مدل مولد آب و هوا (مطالعه موردی: تهران)

رویا حبیب‌نژاد<sup>۱</sup> و علیرضا شکوهی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

این پژوهش به ارزیابی تغییرات منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی<sup>۱</sup> در آینده با مدل منطقه‌ای PRECIS پرداخته و برای تعیین عدم قطعیت پیش‌بینی از مدل K-NN WG استفاده می‌نماید. از سناریوی تغییر اقلیم تاریخی که از تصویر شرایط کنونی در آینده بدست آمد برای تولید حد پایین و از سناریوی انتشار B2 به عنوان سناریوی مرطوب برای تولید حد بالای باند اعتماد پیش‌بینی استفاده گردید. در مدل WG از دو مکانیزم برزیدن<sup>۲</sup> و ایجاد آشفتگی<sup>۳</sup> برای تولید داده‌های تصادفی استفاده گردید. مطالعه موردی بر روی ایستگاه مهرآباد تهران برای دوره تاریخی ۱۹۹۹-۱۹۵۹، دوره پیش‌بینی ۲۱۰۰-۲۰۷۰، برای زمان تداوم رگبار تا ۳ ساعت و دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله صورت گرفت. مقایسه دو سناریوی تغییر اقلیم و شرایط پایه منحنی‌های شدت مدت فراوانی نشان دهنده‌ی افزایش مقادیر و همچنین شدت بارش‌های حدی بود به طوری که بیشینه بارش برای تداوم ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت در آینده تحت سناریوهای تاریخی و مرطوب به ترتیب ۲۶ و ۳۱ درصد نسبت به زمان فعلی افزایش یافت. مقایسه بین سناریوی مرطوب و تاریخی به طور میانگین نشان دهنده‌ی ۴/۸ درصد اختلاف بین این دو سناریو بود. اختلاف کم میان مقادیر حاصل از سناریوی تاریخی به عنوان حد پایین تغییرات و سناریوی مرطوب به عنوان حد بالای تغییرات رگبارهای حدی در آینده، اولاً نشان‌دهنده دقت مناسب مدل PRECIS در شبیه‌سازی بارش برای منطقه مطالعاتی بوده و ثانیاً نشان‌دهنده افزایش محتمل شدت رگبارهای طراحی مورد استفاده برای مقاصد مدیریت سیلاب شهری می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** تغییر اقلیم، عدم قطعیت، پیش‌بینی منحنی شدت مدت فراوانی، مدل WG، PRECIS.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۱۹

1- M.Sc. Graduated Student, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Professor, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. کد پستی:

۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸

\*- نویسنده مسئول

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

بسیاری از مناطق ایران در دسترس نیست. مشکل مزبور زمانی خود را بیشتر نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی منحنی‌های مزبور برای آینده از داده‌های GCM استفاده می‌شود. در این حالت مدل GCM باید دارای قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب (در حد چند کیلومتر و کسری از ساعت) باشد که به طور معمول از طریق ریزمقیاس‌نمایی زمانی و مکانی برون‌داد این مدل‌ها تأمین می‌گردد (Palmer et al., 2004; Southam et al., 1999; Coulibaly and Dibike, 2004). بر این اساس می‌توان اهمیت نحوه ریزمقیاس‌نمایی زمانی و مکانی داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو و اثر آنها را بر دقت برآورد منحنی‌های IDF برای آینده دریافت. با توجه به آنچه که از مفهوم عدم قطعیت استنباط می‌گردد، هرچه عدم قطعیت برآورد داده ورودی به یک مدل طراحی بیشتر باشد به همان نسبت، اعتمادپذیری سیستم کاهش و ریسک شکست پروژه افزایش می‌یابد. در هر حال تعیین میزان عدم قطعیت حاصل از داده‌های ورودی (در این مطالعه IDF) برای انتخاب صحیح پارامترهای طراحی، متناسب با ریسک قابل قبول، امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. عوامل عدم قطعیت را می‌توان به دو دسته تغییرات محیط طبیعی<sup>۵</sup> و عدم وجود دانش کافی<sup>۶</sup> برای مدل کردن پدیده تحت مطالعه تقسیم نمود (Tung and Yen, 2005). برای در نظر گرفتن و همچنین ارزیابی عدم قطعیت دسته اول که مربوط به خاصیت تصادفی بودن داده‌ها است یکی از راه‌های تعیین عدم قطعیت و در عین حال کم کردن بزرگی آن استفاده از توابع چگالی احتمال برای بارش‌های حدی است. استفاده از روش‌های پارامتریک، علی‌رغم توانایی ذاتی آن‌ها، با مسائلی همچون انحراف از توزیع واقعی جامعه به علت کم بودن داده‌های تاریخی با توجه به چوله به راست بودن بارش‌های حدی و نیز احتمال تغییر توزیع احتمالاتی داده‌ها در آینده نزدیک و دور مواجه می‌باشد. در این گونه موارد استفاده از روش‌های ناپارامتری توصیه می‌شود (Littell et al., 2014). در خصوص عامل دوم بروز عدم قطعیت، یعنی استفاده از برون‌داد مدل‌های GCM در پیش‌بینی دراز مدت بارش به طور اعم و بارش‌های کوتاه مدت به طور اخص، می‌توان این عوامل را شامل نوع مدل منتخب از میان مدل‌های اقلیمی جهانی و منطقه‌ای تحت سناریوهای انتشار مختلف و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی زمانی و مکانی دانست. برای غلبه بر عدم قطعیت معنی‌داری که عامل دوم بوجود می‌آورد برخی محققین از ترکیب چند مدل اقلیمی جهانی و منطقه‌ای تحت سناریوهای انتشار و یا تابشی مختلف و چند روش ریزمقیاس‌نمایی استفاده نموده‌اند (Van Der Linden and Mitchell, 2009; Sarr et al., 2015; Sunyer et al., 2014; Alam and Elshorbagy, 2015; Kue et al., 2014; Rodríguez et al., 2014; Mirhosseini et al., 2013). برای استفاده از برون‌داد مجموعه‌ای از مدل‌های GCM فرض بر آن است که استفاده از میانگین یا میانه برآوردها از یک طرف

منحنی‌های شدت، مدت، فراوانی (از این پس IDF نامیده می‌شود) که نشان دهنده فراوانی و حداکثر شدت بارش سالانه به ازای تداوم‌های مختلف می‌باشند برای مقاصد مختلف و بخصوص برای طراحی سازه‌های کنترل و انحراف سیل در شهرها مورد استفاده بوده و در استانداردهای مختلف برای مدیریت سیلاب شهری مورد استناد قرار می‌گیرند. مسأله مهمی که نیازمند توجهی ویژه برای ارزیابی درست ریسک مخاطرات ناشی از سیلاب‌های شهری در آینده است در نظر گرفتن تغییرات شدت بارش‌های کوتاه مدت در اثر تغییر اقلیم می‌باشد. مطالعات صورت گرفته توسط بسیاری از محققین در بسیاری از مناطق جهان منجمله ایران روند صعودی در مقدار و فراوانی بارش‌های کوتاه‌مدت روزانه و ساعتی را پیش‌بینی کرده‌اند (De Paola et al., 2014; Prodanovic and Simonovic, 2008 and 2006; Jahangir et al., 2017; Binesh et al., 2017; Haidari and al., 2003). برخی از پژوهش‌ها نیز نشان دادند که دوره بازگشت یک محققین نیز با مقایسه مقادیر مشاهداتی بارش در دوران معاصر و آینده با مقادیر به دست آمده از منحنی‌های شدت مدت فراوانی تاریخی بر لزوم تغییر منحنی‌های مزبور تأکید نموده‌اند (Al Mamoon et al., 2016; Rodríguez et al., 2014; Mirhosseini et al., 2013; Arnbjerg-Nielsen, 2012; Denault et al., 2002; Waters et al., 2003). برخی از پژوهش‌ها نیز نشان دادند که دوره بازگشت یک واقعه بارندگی با تداوم مشخص در طول زمان تغییر نموده و در یک ارزیابی کلی عموماً روندی نزولی دارند. این امر بدان مفهوم است که بارش‌های شدیدتر از تواتر بیشتری برخوردار شده‌اند (Mailhot and Duchesne, 2010; Fadhel et al., 2017; Aghakouchack et al., 2018; Thanh and Remo, 2018). طبق پیش‌بینی‌های هیأت بین‌الدول تغییرات اقلیم (IPCC<sup>4</sup>, 2012) تا پایان قرن بیست و یکم، مقدار و فراوانی بارش‌های حدی افزایش می‌یابد و این تغییر اثری مستقیم بر سیستم‌های جمع‌آوری زه‌آب شهری دارد (Fadhel et al., 2017; Willems, 2013). براساس موارد یاد شده می‌توان اذعان داشت در حالیکه طراحی سیستم‌های کنترل سیلاب شهری بر اساس منحنی‌های IDF حاصل از داده‌های مشاهداتی گذشته (بطور معمول ۳۰ سال گذشته) انجام می‌پذیرد، با توجه به اثرات تغییر اقلیم بر افزایش مقدار و شدت بارش‌های حدی، نمی‌توان و نباید از این منحنی‌ها برای پیش‌بینی‌های آینده استفاده کرد (Habibnejad and Shokoochi, 2013; Watt and Marsealek, 2020). برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی قابل اعتماد و تأمین اطلاعات مورد نیاز برای تولید منحنی‌های IDF در مناطق شهری باید از داده‌های ساعتی استفاده نمود (Segond et al., 2006; Watt et al., 2003; Habibnejad and Shokoochi, 2020). این در حالی است که داده‌های بارش ثبت شده با قدرت تفکیک ساعتی در بسیاری از مناطق دنیا از جمله برای

آینده با کیفیت بالا در مطالعه موردی خود در رودخانه لانگات، از روش نمونه‌برداری  $LHS^9$  و آنالیز فراوانی منطقه‌ای مبتنی بر گشتاورهای خطی استفاده کردند. ایشان به منظور بررسی عدم قطعیت شدت بارش در منحنی‌های IDF از روش bootstrap و توزیع آماری GEV استفاده نمودند. نتایج ایشان نشان داد که برای مدل‌سازی قابل اطمینان برای شدت‌های مختلف بارش در آینده بهتر است یک فاصله اطمینان در نظر گرفته شود. (Alam and Elshorbagy (2015) در مطالعه موردی خود منحنی‌های IDF آینده را تحت شرایط تغییر اقلیم در شهر سسکاتون واقع در کانادا تولید کردند. ایشان برای پیش‌بینی منحنی‌های IDF در آینده از توزیع GEV و برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از مقیاس، از هشت مدل GCM تحت سناریوهای تابشی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 استفاده نمودند. نتایج حاکی از افزایش شدت و فراوانی بارش‌های حدی در آینده بود. آنها به این نتیجه رسیدند که عدم قطعیت منحنی‌های IDF بیشتر ناشی از مدل‌های GCM و نحوه ریزمقیاس‌نمایی آنهاست. Sunyer et al. (2015) از هشت روش آماری برای ریزمقیاس‌نمایی و پانزده مدل منطقه‌ای (RCM) برای یازده حوضه در اروپا استفاده نمودند. نتایج این محققین نشان‌دهنده‌ی افزایش شدت بارش‌های حدی در بیشتر حوضه‌های منطقه مطالعاتی بود. همچنین ایشان توصیه کردند برای ارزیابی عدم قطعیت، استفاده از چند روش ریزمقیاس‌نمایی ضروری است. (Mirhosseini et al. (2013) تغییرات منحنی‌های IDF آینده نسبت به حال را در آلاباما آمریکا مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان از ترکیب شش مدل اقلیمی جهانی و منطقه‌ای و ریزمقیاس‌زمانی آماری برای غلبه بر عدم قطعیت استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق در مورد بارش‌هایی با تداوم بیش از ۴ ساعت قابل قبول نبود، لذا محققین مزبور توصیه کردند برای کاهش عدم قطعیت و حصول نتایج قابل اطمینان‌تر، از روش‌های مبتنی بر احتمالات برای ایجاد IDFها استفاده شود. (Watt and Marsalek (2013) در یک مطالعه مروری به بررسی مفهوم رگبار طرح پرداختند. با ارائه شش ویژگی اصلی رگبار طرح شامل (۱) دوره بازگشت طراحی، (۲) زمان تداوم، (۳) روابط شدت مدت فراوانی، (۴) توزیع زمانی، (۵) فاکتور کاهش سطح و (۶) شرایط رطوبتی پیشین بیان کردند که برای تعیین رگبار طرح باید کلیه ویژگی‌های رگبار، شرایط تغییر اقلیم در آینده و اثر آن روی بارش کوتاه مدت و عدم قطعیت ذاتی موجود در روابط IDF در نظر گرفته شوند.

در ارتباط با عدم قطعیت در تولید منحنی‌های IDF در ایران پژوهش‌های زیادی صورت نگرفته و در اغلب مطالعات صورت گرفته به ارزیابی عدم قطعیت کل بارش شبیه‌سازی شده در آینده پرداخته شده است. (Arfaa and Naseri (2019) برای ارزیابی عدم قطعیت

عدم قطعیت استفاده از مدل‌های بزرگ مقیاس را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر داشتن حجم انبوهی از داده‌های پیش‌بینی، واریانس جامعه در آینده را بدست می‌دهد و بدین ترتیب از ساده‌ترین روش ممکن و به کمک انحراف از معیار داده‌ها می‌توان عدم قطعیت حول میانگین داده مورد نظر را بدست آورد. در پژوهش حاضر با توجه به مشکلات تعیین و پوشش هر دو منشأ عدم قطعیت، برای دسته اول از موتور تولید داده تصادفی به روش ناپارامتریک نزدیک‌ترین همسایگی و برای دسته دوم، از مدل تغییر اقلیم منطقه‌ای PRECIS استفاده به عمل آمده است. داده‌ها و روش ریزمقیاس‌نمایی زمانی مورد استفاده در این پژوهش برای کاستن از عدم قطعیت ناشی از استفاده از داده‌های بزرگ مقیاس، تحقیقی است که (Habibnejad and shokoochi (2020) استفاده از مدل منطقه‌ای PRECIS با قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۵۰ کیلومتر و قدرت تفکیک زمانی روزانه برای ایستگاه سینوپتیک مهرآباد در کلانشهر تهران انجام داده‌اند. برای لحاظ داشتن و ارزیابی عدم قطعیت ناشی از عوامل طبیعی نیز از یک نوع مدل تولید داده آب و هوایی<sup>۷</sup> که دارای دو مکانیزم برزیدن و ایجاد آشفستگی می‌باشد و در بخش مواد و روشها شرح آن خواهد آمد استفاده شده است. ادبیات مربوط به عدم قطعیت مدل‌های پیش‌بینی بارش‌های مورد استفاده در تولید IDF چندان غنی نیست. لذا با توجه به اهمیت بارش‌های کوتاه مدت در تولید منحنی‌های شدت مدت و فراوانی باید مطالعات بسیاری در این زمینه صورت پذیرد. (Noor et al. (2018) با استفاده از برونداد هشت مدل GCM تحت سناریوهای تابشی RCP 8.5 و RCP 4.5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی  $MOS^A$  منحنی‌های IDF آینده تحت شرایط تغییر اقلیم را در شبه جزیره مالزی به‌روزرسانی کردند. همچنین به منظور بررسی عدم قطعیت از چارک اول، میانه و چارک سوم شدت‌های بارش استفاده نمودند. نتایج حاکی از افزایش شدت بارش با تداوم کوتاه نسبت به شدت بارش با تداوم بلند مدت بود. این محققین به این نتیجه رسیدند که عدم قطعیت پیش‌بینی‌های GCM در مورد شدت بارش‌های با تداوم کم، بیش از شدت بارش‌های بلند مدت در شبه جزیره مالزی است. (Shrestha et al. (2017) با توجه به اثر تغییرات اقلیم و افزایش وقوع بارش با شدت بیشتر، به منظور بررسی عدم قطعیت و به‌روزرسانی منحنی‌های IDF شهر بانکوک در تایلند، از نه مدل GCM و برای ریزمقیاس‌نمایی از LARS-WG برای دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ استفاده نمودند. منحنی‌های IDF به دست آمده از تمام مدل‌ها نشان‌دهنده‌ی افزایش شدت بارش‌های حدی برای همه دوره بازگشت‌ها بود. این محققین برای بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی‌های آینده، ترکیب چند مدل GCM و چند روش ریزمقیاس‌نمایی را توصیه نمودند. (Hung et al. (2016) با توجه به اهمیت منحنی‌های IDF در طراحی زیرساخت‌های شهری با هدف کاهش خسارات مالی و جانی و دستیابی به منحنی‌های IDF

آشفتگی" استفاده نمود. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی افزایش بیش از ۵۰٪ رگبار طراحی ۱۰ ساله در کشور بلژیک بود. وی همچنین نشان داد که برای مقابله با سیل‌های آتی باید ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن سدها ۱۱٪-۵۱٪ افزایش یابد. (King et al. (2015) از نسل چهارم مدلی بنام KnnCAD برای تولید داده‌های بارش و حرارت به صورت ناپارامتری استفاده نمودند و استفاده از دو تکنیک برزدن و ایجاد آشفتگی را برای تولید داده‌های حدی موفقیت آمیز گزارش نمودند. آنها استفاده از روشهای پارامتریک را بنابر دلایلی همچون وابستگی به فرضیات آماری در خصوص پارامترهایی که دارای رگرسیون مکانی و توزیع احتمالاتی خاص خود هستند توصیه نکردند. Gar et al. (2016) الگوریتم weather generator ناپارامتریک را برای مدل‌سازی چندگانه‌ی دما و بارش بهبود بخشیدند. ایشان مدل خود را برای حوضه‌ی رودخانه‌ی تایمز با موفقیت اجرا کردند.

همانطور که ملاحظه شد بیشتر مطالعات موردی، به افزایش بارش‌های حدی برای اقلیم آینده اشاره دارند. همچنین، در اغلب مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل عدم قطعیت منحنی‌های شدت مدت فراوانی، از خروجی چند GCM و با به‌کارگیری چند روش ریزمقیاس‌نمایی استفاده به عمل آمده است. در کنار مشکلاتی که در بالا بدان اشاره شد ایراد مهم دیگر مدل‌های GCM تولید بارش متوسط در گام زمانی ماهانه و در بهترین حالت در گام زمانی روزانه و لذا عدم توانایی آنها در تولید بارش‌های حدی کوتاه مدت می‌باشد (Peck et al., 2012; Simonovic and Pradonovic, 2007-2008). فرض اصلی پژوهش حاضر آن است که می‌توان با تولید داده‌های مشابه داده‌های ثبت شده کنونی، انتقال آنها در زمان و نهایتاً با آشفته کردن آنها برای دیدن آنچه که در آینده ممکن است رخ دهد، حد پایین تغییرات محتمل بارش‌های حدی در آینده را به دست آورد و عیناً با آشفته کردن داده‌های یک سناریوی مرطوب از مدل‌های تغییر اقلیم در آینده، حد بالای تغییرات بارش‌های کوتاه مدت را محاسبه نمود. بدین ترتیب باند اعتمادی برای پیش‌بینی بارش‌های طراحی ساخته خواهد شد که حد پایین آن سناریوی تاریخی انتقال یافته در زمان و حد بالای آن سناریوی مرطوب حاصل از یک مدل تغییر اقلیم دینامیکی با دقت مناسب مکانی و زمانی می‌باشد. در پژوهش حاضر برای ارزیابی عدم قطعیت پیش‌بینی منحنی‌های IDF از ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و برای تعیین محدوده تغییرات بارش‌های حدی از دو سناریوی تغییر اقلیم مرطوب و تاریخی استفاده به عمل آمده است. در بخش‌های بعد عدم قطعیت منحنی‌های IDF در حوضه غرب تهران، با بهره‌گیری از داده‌های ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک مهرآباد، با استفاده از مولدهای آب و هوایی K-Nearest Neighbor-weather generator و تولید داده‌های حدی برای آینده دور (۲۰۷۰-۲۱۰۰) و

در برآورد مقادیر حدی بارش از روش‌های DMDM، چندایستگاهی و داده‌های بارش ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته استفاده نمودند. نتایج نشان دهنده برتری مدل DMDM در مقایسه با روش SDSM در شبیه‌سازی مقادیر حدی بارش بود. (Kaboli (2019) در مطالعه موردی خود در استان خراسان رضوی نحوه تغییر مقادیر IDF تحت ده سناریو اقلیمی مشتق شده از مدل‌های اقلیم جهانی و سناریوی انتشار A1B برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ را ارائه نمودند. ایشان مقادیر IDF را برای ۲۳ ایستگاه مورد بررسی تحت سناریوهای اقلیمی آینده در سه سطح ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ برآورد نمودند. نتایج حاکی از تغییر بین ۲۳٪ تا ۷۳٪ شدت بارش‌ها در سطح ریسک ۵۰٪ نسبت به دوره پایه ۲۰۱۲-۱۹۹۳ بود. همچنین نشان دادند که در دوره‌های بازگشت بالاتر دامنه تغییرات وسیع‌تر خواهد بود. به منظور پوشش دادن اهداف پژوهش در خصوص عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن داده‌ها، در تحقیق حاضر مدلی برای تولید داده‌های بارش کوتاه مدت مورد استفاده قرار گرفته است که در ابتدا Yates (2003) با عنوان مدل K-Nearest Neighbor برای تولید داده‌های روزانه هواشناسی در مقیاس منطقه‌ای توسعه داد. در حالی که در تولید داده‌های حدی باید ارقامی را تولید کرد که مقادیر خارج از محدوده داده‌های مشاهداتی را نیز پوشش دهند، محدودیت اصلی مدل مزبور عدم تولید داده‌های جدید بود زیرا این مدل با استفاده از تکنیک reshuffle (برزدن) داده‌های تاریخی، یک سری زمانی از متغیر آب و هوایی مشابه سری زمانی تاریخی تولید می‌نمود. (Sharif and Burn (2007) در توسعه این مدل و برای پوشاندن ضعف یاد شده از رویکرد ایجاد آشفتگی یا Perturbation استفاده کردند تا مدل بتواند با آشفته کردن داده‌های تاریخی، داده‌های محتمل خارج از محدوده‌ی داده‌های مشاهداتی را تولید کند. در این ارتباط نیز تجربیاتی هر چند مختصر در سطح دنیا وجود دارد. Peck et al. (2012) در تحلیل منحنی‌های شدت مدت فراوانی شهر لندن در ایالت انتاریوی کانادا تحت تاثیر تغییر اقلیم از الگوریتم ناپارامتریک K-Nearest Neighbor-weather generator برای ایجاد سری زمانی طولانی از داده‌ها استفاده نمودند. آنها برای ورودی مدل از نه سری داده‌ی ماکزیمم بارش روزانه با تداوم بارش ۵ تا ۲۴ ساعته در دوره زمانی ۲۰۰۲-۱۹۶۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد که شدت و مقدار بارش در آینده افزایش خواهد داشت که پیامدهای زیادی در زمان حال و آینده در طراحی و نگهداری زیرساخت‌های مدیریت آب شهری دارد. (Willems (2013) به بازنگری ضوابط طراحی سیستم‌های زهکشی تحت شرایط تغییر اقلیم پرداخت و برای در نظر گرفتن عدم قطعیت، از ۴۴ مدل تغییر اقلیم منطقه‌ای (RCM) و ۶۹ مدل تغییر اقلیم جهانی (GCM) تحت سناریوهای انتشار مختلف و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری استفاده کرد. این محقق در هر سناریوی انتشار و در هر سری زمانی بارش تاریخی ۱۰ دقیقه از روش "ایجاد

در قالب مدل منطقه‌ای PRECIS مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- مواد و روشها

این پژوهش به بررسی عدم قطعیت برآورد منحنی‌های IDF آینده ایستگاه سینوپتیک مهرآباد پرداخته است. در این پژوهش برای تجزیه و تحلیل تغییرات احتمالی منحنی IDF در آینده، از دو سناریوی تغییر اقلیم با عناوین سناریوی تغییر اقلیم تاریخی (حد پایین) و سناریوی تغییر اقلیم مرطوب (حد بالا) استفاده به عمل آمده است. این دو سناریو محدوده‌ی تغییرات اقلیمی احتمالی در آینده را نشان می‌دهند. برای ایجاد این دو سناریو، از داده‌های تاریخی و اصلاح شده با فاکتور زمانی و همچنین از داده‌های ریزمقیاس شده زمانی و بدست آمده از مدل PRECIS به عنوان ورودی مدل WG استفاده شده است. در نهایت با استفاده از داده‌های تولید شده توسط مدل WG، منحنی IDF تحت هر دو سناریو ایجاد شده است. در شکل ۱ طرح‌نمای پژوهش ارائه شده است.

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های بارش

ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران که داده‌های بارش کوتاه مدت را جمع‌آوری می‌کند، در طول و عرض جغرافیایی ۳۵/۴۱ و ۵۱/۱۹ درجه

قرار گرفته و دارای ارتفاع ۱۱۹۰/۸ متر بالاتر از سطح دریا است. میانگین بارش سالانه در این ایستگاه ۲۳۲/۷ میلی‌متر در سال می‌باشد. شکل شماره ۲ موقعیت ایستگاه مهرآباد تهران را نشان می‌دهد. داده‌های بارش ثبت شده در این ایستگاه طی دوره ۱۹۹۰-۱۹۵۹ در فواصل ۱۰ دقیقه‌ای از سازمان هواشناسی کل کشور تهیه شده است. دوره‌ی پیش‌بینی با استفاده از مدل PRECIS و ریزمقیاس‌نمایی مکانی دینامیکی مربوط به سالهای ۲۱۰۰-۲۰۷۰ و تحت سناریو B2 در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد. اطلاعات مربوط به دوره زمانی و سناریوی یاد شده از سازمان متولی این مدل در مرکز هادلی انگلیس (Hadley Centre) تهیه شده است. دوره زمانی یاد شده تنها دوره‌ای است که این سازمان از مدل تغییر اقلیم منطقه‌ای و دینامیکی PRECIS در اختیار محققین ایرانی قرار می‌دهد.

### ۲-۲- سناریوهای تغییر اقلیم

به طور کلی سناریوهای تغییر اقلیم به عنوان خروجی‌های شبیه‌سازی مدل‌های گردش جهانی به دست می‌آیند. این سناریوها آینده را پیش‌بینی نمی‌کنند بلکه نشان‌دهنده‌ی اتفاقاتی می‌باشند که ممکن است در آینده تحت عواملی مانند رشد مداوم جمعیت، انتشار گاز کربن دی‌اکسید، افزایش شهرنشینی و غیره رخ دهند، بنابراین نتایج نهایی اثرات تغییر اقلیم مستقیماً به سناریوی انتخابی بستگی دارد. (Prodonovic and Simonovic, 2008).

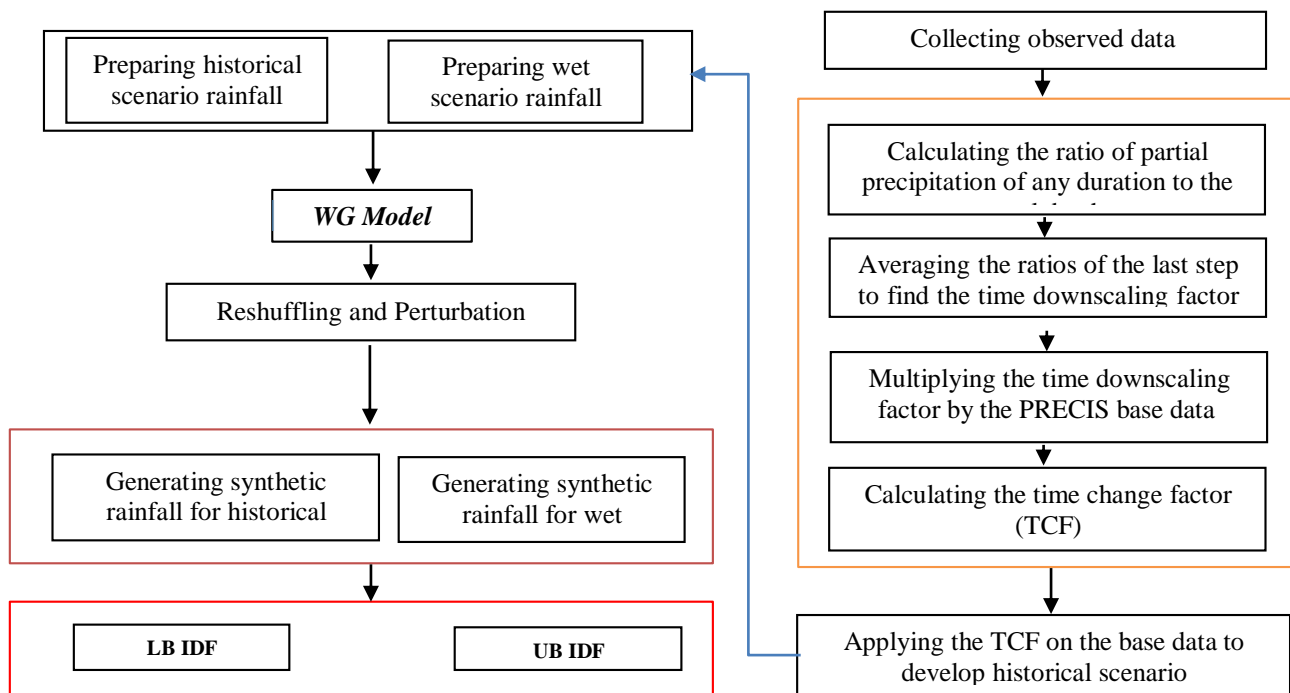


Fig. 1- Flowchart of the research

شکل ۱- طرحواره پژوهش



Fig. 2- Mehrabad synoptic station- Tehran Location

شکل ۲- موقعیت ایستگاه هواشناسی مهرآباد-تهران

مهرآباد تهران به عنوان ورودی مدل WG برای شبیه‌سازی رویدادهای بارش مشابه با آنچه که در گذشته مشاهده شده است، استفاده می‌کند. این مدل با استفاده از دو مکانیزم برزند و ایجاد آشفستگی، رویدادهای بارش حدی‌ای را ایجاد می‌کند که در داده‌های ثبت شده مشاهده نشده است و براین اساس می‌تواند عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن داده‌ها (natural variability) را بروشی ناپارامتریک بدست دهد. برای سناریوی مرطوب نیز در مرحله اول با استفاده از روشی که توسط Habibnejad and Shokoochi (2020) توسعه داده شده است داده‌های بارش کوتاه مدت برای آینده از مدل PRECIS به دست آمدند و سپس در مرحله دوم با استفاده از مدل مولد داده آب و هوایی (WG) داده‌های حدی لازم برای آینده تولید شدند. همانطور که در طرحواره پژوهش در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد در تولید داده برای سناریوهای تاریخی و مرطوب برای ورود به مدل WG از دو فاکتور ریزمقیاس‌نمایی زمانی و تغییر زمان ( $TCF^{12}$ ) استفاده شده است. برای توضیح نحوه تولید این دو فاکتور از یک مثال استفاده می‌شود. یک رویداد بارش در سال ۱۹۷۸ رخ داده و از ساعت ۱۷:۳۰ تا ۲۰:۳۰ ادامه داشته و میزان کل آن معادل ۵/۳ میلی‌متر بوده است. به عنوان مثال اگر هدف ارزیابی بارش ۱۰ دقیقه‌ای در این رخداد باشد، نسبت بارش ۱۰ دقیقه (به عمق مثلاً a میلی‌متر) به میزان کل بارش یعنی ۵/۳ میلی‌متر به دست آورده می‌شود. این عمل برای همه بارش‌های ۱۰ دقیقه‌ای در سال‌های ۱۹۷۸-۱۹۹۰ تکرار می‌گردد و سپس از همه نسبت‌های به دست آمده میانگین‌گیری می‌شود. در مطالعه حاضر

در این مطالعه برای تعیین باند اعتماد پیش‌بینی، هر دو منبع عدم قطعیت که پیش از این اشاره شد مد نظر قرار گرفته است. در مرحله اول برای کاهش عدم قطعیت از مدل دینامیکی منطقه‌ای PRECIS استفاده شده است که دقت آن برای منطقه مطالعاتی، پیشتر مورد ارزیابی قرار گرفته است (Habibnejad and Shokoochi, 2020) و در مرحله دوم برای احتساب منبع عدم قطعیت ناشی از کاستی‌های مدل ریاضی (knowledge deficiency)، یعنی نتایج مدل RCM از دو سناریوی: ۱) تغییر اقلیم تاریخی (باند پایین  $LB^{10}$ ) و ۲) تغییر اقلیم مرطوب (باند بالا  $UB^{11}$ )، به منظور تعریف محدوده‌ی اثرات بالقوه تغییر اقلیم استفاده شده است. در واقع با استفاده از دو سناریوی مزبور باند اطمینان برای نمایش تغییرات بارش‌های کوتاه مدت در آینده تولید خواهد شد. سناریوی اول نشان دهنده‌ی تغییرات احتمالی آینده با فرض انتشار گاز کربن دی‌اکسید در حد کنونی در جو است. در واقع این سناریو در نظر می‌گیرد که انتشار گاز دی‌اکسید کربن در جو در آینده دور ثابت و در حد کنونی باشد. سناریوی دوم نشان دهنده‌ی تغییر شرایط تغییر اقلیم به اقلیم گرم‌تر و مرطوب‌تر در آینده نسبت به حال حاضر است که در آن رویدادهای اقلیمی مانند بارش‌های حدی با فراوانی بیشتری اتفاق می‌افتند. لازم به ذکر است که سناریو B2 بر راه‌حل‌های محلی برای رفاه اقتصادی، اجتماعی و محیطی اشاره داشته و براین نکته تأکید دارد که تغییرات گوناگون تکنولوژی به سمت حفاظت از محیط زیست و حقوق اجتماع در سطح منطقه‌ای پیش می‌رود. سناریوی تغییر اقلیم تاریخی از داده‌های تاریخی ایستگاه

ضریب تبدیل بارش روزانه به تداوم بارش ۱۰ دقیقه، مقدار ۰/۲ به دست آمد (جدول ۱). این مقدار در داده‌های پایه و پیش‌بینی تولید شده توسط مدل PRECIS در مقیاس روزانه ضرب می‌شود تا بارش با تداوم‌های مورد نظر ایجاد گردد. این ضریب، فاکتور ریزمقیاس‌نمایی زمانی نامیده شده است. در گام بعد لازم است نسبت تداوم بارش ۱۰ دقیقه در دوره پیش‌بینی به پایه مدل RCM محاسبه شود. این ضریب که فاکتور تغییر زمانی بوده و در تحقیق حاضر TCF نامیده شده است، برای زمان تداوم ۱۰ دقیقه معادل ۱/۱۸ محاسبه شده است (Habibnejad and Shokoohi, 2020). این فاکتور سبب انتقال داده‌های تاریخی به دوره زمانی مورد نظر و قبل از ورود به مدل WG خواهد شد. اکنون می‌توان با داشتن داده‌های تاریخی و همچنین داده‌های ریزمقیاس شده زمانی در سناریوی مرطوب در افق مطالعه، عملیات برزیدن و ایجاد تالطم در هر دو سری داده‌ها را در مدل مولد آب و هوا (WG) انجام داد و سری زمانی مصنوعی طولانی مدت بارش از ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت را برای ساخت به ترتیب باندهای پایین (LB) و بالای (LB) منحنی‌های IDF پیش‌بینی تولید نمود.

#### ۳-۲- مدل WG

در این پژوهش از مدل Weather Generator که به اختصار WG نامیده می‌شود و الگوریتم ناپارامتریک K-Nearest Neighbor، در گام‌های زمانی ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت به منظور ایجاد سری زمانی طولانی مدت مصنوعی از داده‌های آب و هوایی استفاده شده است. مدل WG از الگوریتم‌های ریاضی پارامتریک یا ناپارامتریک برای تولید آمار بلند مدت از داده‌ها بر اساس الگوهای بارندگی مشاهده شده محلی استفاده می‌کند (Peck et al., 2012). الگوریتم پارامتریک مدل WG داده‌های آب و هوا را با فرض داشتن تابع توزیع احتمال، ایجاد می‌کند، در حالیکه الگوریتم ناپارامتریکی آن به تابع توزیع احتمال نیاز نداشته و متکی بر روش‌های نمونه‌برداری تصادفی از داده‌های موجود و در عین حال برزیدن داده‌ها است. الگوریتم پارامتریک این مدل در شبیه‌سازی رخداد‌های پیوسته مانند خشکسالی و بارش‌های طولانی مدت دارای محدودیت می‌باشد در حالی که نوع ناپارامتریک آن این محدودیت را ندارد (Sharif and Burn, 2007). در توضیح اساس کار مدل WG به طور مختصر می‌توان گفت که این مدل از دو مکانیزم استفاده می‌کند (Simonovic and Pradonovic, 2007; Sharif and Burn, 2007): الف) انتخاب تصادفی و سپس به‌کارگیری مکانیزم برزیدن برای تولید داده‌های مصنوعی شبیه داده‌های مشاهده شده و ب) مکانیزم ایجاد آشفتنگی که داده‌های شبیه‌سازی شده را در خارج از مرزهای داده‌های تاریخی خود قرار می‌دهد و در نتیجه موجب ایجاد بارش‌های حدی می‌شود که احتمال رخداد آنها وجود دارد اما

هنوز مشاهده نشده‌اند. ویژگی‌های الگوریتم K-Nearest Neighbor (K-NN) که در مدل ناپارامتری مدل استفاده می‌شود عبارتند از: ۱) قادر به مدل‌سازی غیرخطی پویای فرایندهای ژئوفیزیکی است، ۲) نیازی به شناسایی توزیع احتمالاتی داده‌ها ندارد، ۳) همبستگی زمانی و مکانی داده‌های تولید شده را حفظ می‌کند. شبیه‌سازی داده‌های تصادفی در الگوریتم K-NN با جمع‌آوری داده‌های مشاهداتی برای یک ایستگاه مورد نظر آغاز می‌شود. برای تولید یک داده هواشناسی (در این تحقیق بارش) جدید، تمام روزها با ویژگی مشابه از داده‌های مشاهداتی استخراج می‌شوند. این داده‌ها به عنوان مجموعه نزدیک‌ترین همسایگان نامیده می‌شوند. در این مورد به‌طور معمول از یک پنجره متحرک با عرض دو هفته استفاده می‌شود. به عنوان مثال اگر روز مورد نظر ۷ فروردین باشد، از ۱۱ فروردین ماه تا ۱۴ ام در همه‌ی سال‌هایی که داده موجود است به‌جز مقدار داده مربوط به ۱۷ ام فروردین به عنوان مجموعه نزدیک‌ترین همسایگان شناخته می‌شود. فاصله بین میانگین مقدار یک متغیر (بارش) برای روز جاری و مجموعه نزدیک‌ترین همسایگان از طریق فاصله متریک ماهالانویس محاسبه شده و از کوچکترین به بزرگترین مرتب می‌گردد. از مجموعه نزدیک‌ترین همسایگان مرتب شده، تنها مقدار اولیه K برای آنالیز انتخاب می‌شود (K تابعی از تعداد همسایگان است). مقدار همسایه انتخاب شده به عنوان مقدار روز مورد نظر انتخاب می‌شود. سپس مدل با استفاده از دو مکانیزم برزیدن و ایجاد آشفتنگی داده‌های مصنوعی، شبیه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده را در خارج از مرزهای داده‌های تاریخی تولید می‌کند.

#### ۴-۲- آنالیز شدت، مدت و فراوانی

توزیع GEV به عنوان بهترین توزیع احتمالاتی برای ایستگاه مهرآباد شهر تهران بر اساس آزمون‌های مختلف انتخاب شد (Habibnejad and Shokoohi, 2020). توزیع احتمالاتی GEV یک توزیع احتمالاتی پیوسته است که از ترکیب توزیع‌های ویبل، فرچت و گمبل به دست می‌آید و مبتنی بر بارش‌های حدی است (Mirhosseini et al., 2012). منحنی شدت، مدت و فراوانی براساس گام‌های زیر تولید شدند: ۱) استخراج بیشینه بارش در هر تداوم بارش، ۲) برازش توزیع احتمالاتی GEV به بیشینه داده‌های بارش و استخراج عمق بارش در هر دوره بازگشت، ۳) محاسبه شدت بارش، ۴) تکرار گام‌های قبل برای تمام تداوم‌های بارش و ۵) رسم نمودار شدت بارش مقابل تداوم بارش برای دوره بازگشت‌های مختلف. این گام‌ها برای داده‌های بارش کوتاه مدت پایه، تاریخی و داده‌های ریزمقیاس شده‌ی زمانی مدل PRECIS در دوره پیش‌بینی تحت سناریو انتشار B2 تکرار شدند.

## ۲-۵- مقایسه شدت مدت فراوانی تحت تاثیر تغییر اقلیم

منحنی شدت مدت فراوانی بدست آمده توسط دو سناریوی تغییر اقلیم با منحنی شدت مدت فراوانی پایه (به دست آمده از داده‌های جمع‌آوری شده) به منظور ارزیابی عدم قطعیت و تعیین باند اعتماد مقایسه شدند. تفاوت نسبی بین منحنی‌ها با استفاده از رابطه‌ی زیر تعیین شده است که در آن  $x_1$  داده مربوط به سناریوی اول و  $x_2$  داده مربوط به سناریوی دوم است.

$$\text{Difference} = |x_1 - x_2| / ((x_1 + x_2) / 2) \times 100 \quad (1)$$

## ۳- نتایج

در این بخش، به تحلیل و تعیین باند اعتماد منحنی شدت، مدت و فراوانی ایستگاه مهرآباد تهران با استفاده مدل WG پرداخته شده است. برای ریزمقیاس‌نمایی زمانی از روش آماری ارائه شده در پژوهش Habibnejad and Shokoohi (2020) استفاده به عمل آمد. ضرایب تبدیل (ضرایب ریزمقیاس‌نمایی زمانی) مورد استفاده برای تداوم‌های مختلف بارش در جدول ۱ آورده شده است.

## ۳-۱- ارزیابی مدل WG

برای ارزیابی مدل WG به شبیه‌سازی داده‌های دوره تاریخی اقدام شد و مهمترین آماره‌های دو جامعه تاریخی و شبیه‌سازی شده مورد آزمون قرار گرفتند. نتیجه این آزمون برای سه دوره زمانی ۱۰ دقیقه، ۱ و ۳ ساعت در شکل ۳ گزارش شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد اولاً دو گشتاور اصلی معرف جامعه یعنی میانگین و میانه همه دوره‌های زمانی در محدوده باند اعتماد میانگین و میانه شبیه‌سازی شده بوده و ثانیاً روند صعود منحنی احتمال تجمعی تجربی آنها (بدون در نظر گرفتن توزیعی خاص) مشابه هم می‌باشد.

## ۳-۲- بررسی منحنی IDF تحت تأثیر تغییر اقلیم

مدل WG با استفاده از مجموعه داده‌های بارش برای هر دو سناریو تغییر اقلیم معرفی شده اجرا گردید و منحنی IDF برای سناریوی تاریخی و سناریو انتشار حالت مرطوب ایجاد شدند. جدول ۲ نشان دهنده مقادیر شدت، مدت و فراوانی داده‌های پایه و اشکال ۴ تا ۶ منحنی IDF حاصل از مقادیر داده‌های مشاهده شده و دو سناریوی تاریخی و مرطوب را نشان می‌دهند.

با توجه به نمودارهای ذیل واضح است که مقادیر شدت بارش در همه تداوم‌های بارش در هر دو سناریوی تغییر اقلیم نسبت به منحنی شدت مدت و فراوانی حاضر (پایه) افزایش داشته است. تکرار این نکته لازم

است که هر دو سناریو ممکن است در آینده رخ دهند با این تفاوت که سناریوی تغییر اقلیم مرطوب، حد بالای تغییرات احتمالی در مقدار فراوانی بارش‌های حدی و سناریو تغییر اقلیم تاریخی مرز پایینی از تغییرات اقلیمی آینده را به دست می‌دهد و بنابراین بترتیب برای اتخاذ بالاترین و کمترین حد استراتژی‌های سازگاری با تغییر اقلیم در منطقه قابل توصیه می‌باشند.

## ۳-۳- تعیین باند اعتماد برای منحنی IDF با مدل WG

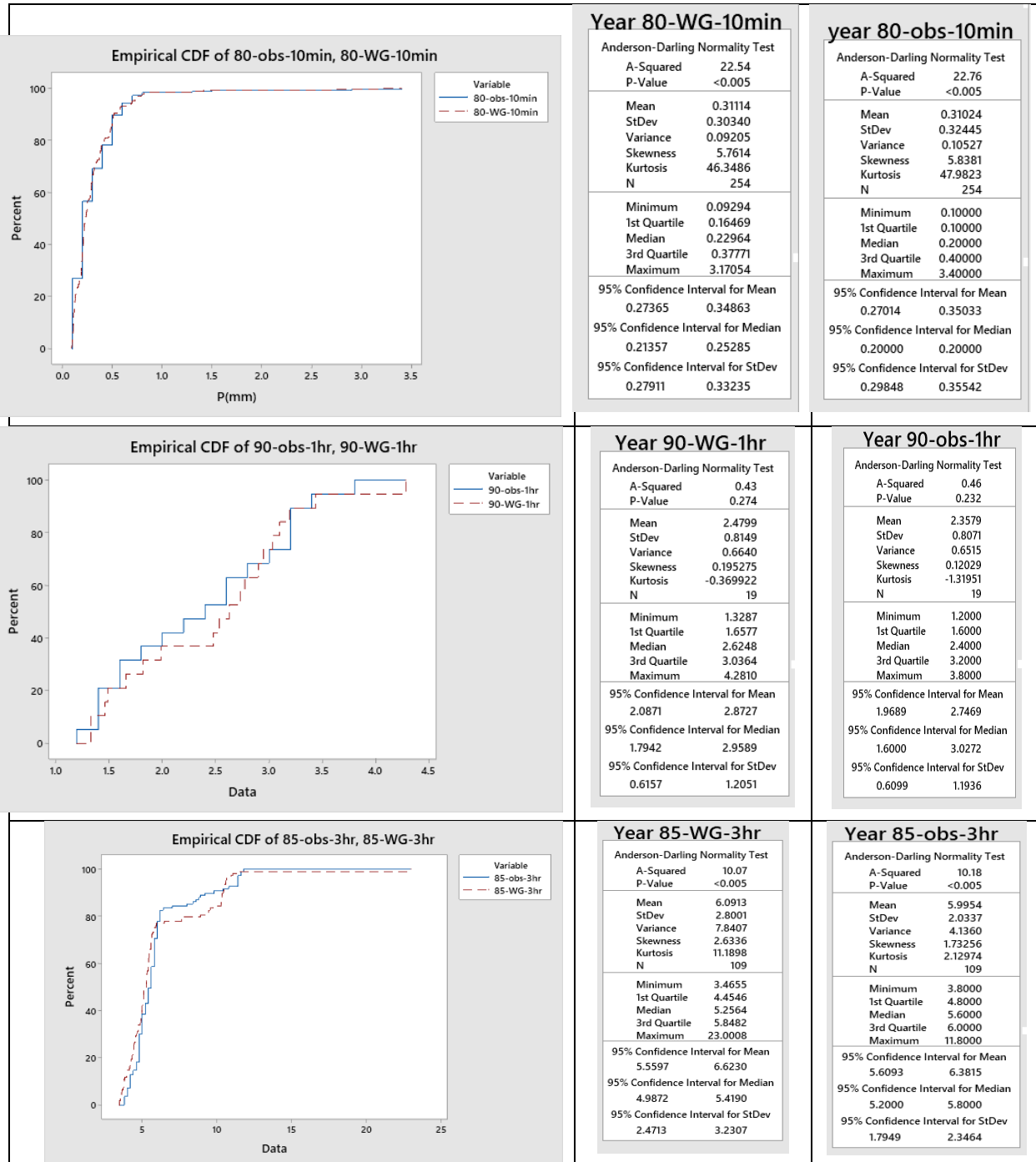
به منظور بررسی نتایج بدست آمده در دو سناریوی تاریخی و مرطوب با همدیگر و سناریوی پایه (داده‌های زمان حاضر) اختلاف میان شدت بارش در سناریوی مرطوب از شدت متناظر در سناریوی تاریخی و سناریوی تاریخی و مرطوب از سناریوی پایه در هر دوره بازگشت و به ازای تمامی زمانهای تداوم محاسبه و در شکل‌های ۷-ا تا ۷-ج ترسیم شده‌اند. همانطور که در شکل ۷-ا ملاحظه می‌گردد شدت بارش در سناریوی تاریخی همواره پایین‌تر از مقادیر مربوطه در سناریوی مرطوب می‌باشد. در این ارتباط بطور کلی هر چه دوره بازگشت بزرگتر باشد اختلاف شدت بارش در دو سناریو کمتر می‌شود، چنان‌که برای دوره بازگشت ۲ سال حداکثر اختلاف در حدود ۲۰ درصد ولی برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال حداکثر این اختلاف کمتر از ۶٪ می‌باشد. در مورد اختلاف شدت رگبارهای زمان حاضر و سناریوهای تاریخی و مرطوب برای آینده دور، آن نظمی که در مقایسه سناریوهای تاریخی و مرطوب گزارش شد، دیده نمی‌شود. در این حالت مشخصاً برای رگبارهای ۶۰ دقیقه‌ای و کمتر، اختلاف شدت رگبارهای سناریوها از ۲ ساله به ۱۰۰ ساله کمتر شده ولی زمانی که دوام رگبار به حوالی ۲ ساعت می‌رسد رگبارهای با دوره بازگشت بزرگتر اختلاف بیشتری را با آنچه که هم اکنون شاهد هستیم نشان می‌دهند. جالب توجه آن است که در این روند، تفاوت معنی‌داری میان سناریوی مرطوب و خشک ملاحظه نمی‌شود. به طور متوسط، منحنی IDF حاصل از سناریوی تغییر اقلیم تاریخی ۲۶ درصد و منحنی IDF حاصل از سناریو مرطوب حدود ۳۱ درصد بالاتر از منحنی IDF فعلی است. همانطور که ملاحظه می‌گردد حداکثر اختلاف بدست آمده بین شدت‌های رگبار حاصل از سناریوی مرطوب و حال حاضر برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال و زمان تداوم بین ۱/۵ ساعت تا ۲ ساعت از حدود ۴۰ درصد تجاوز می‌کند و همین نتیجه برای اختلاف سناریوی خشک و حال حاضر نیز تکرار می‌گردد. دو نکته جالب از شکل‌های ۷-ا و ۷-ب قابل برداشت می‌باشد؛ اول آنکه به طور متوسط رشد مابین ۲۰ تا ۴۰ درصد در شدت رگبارها در تهران دیده می‌شود (که با نتایج Habibnejad and Shokoohi (2020) مطابقت دارد) و دوم آنکه عدم قطعیت با توجه به فاصله کم باند بالا و پایین در این مدعا زیاد نیست.



**Table 1- Factors for changing simulated daily rainfall by PRECIS to short-duration rainfall**

**جدول ۱- ضرایب تبدیل بارش روزانه مدل PRECIS به تداوم‌های کوتاه مدت**

Duration (min)	10	20	30	40	50	60	90	120	180
Change Factor	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7



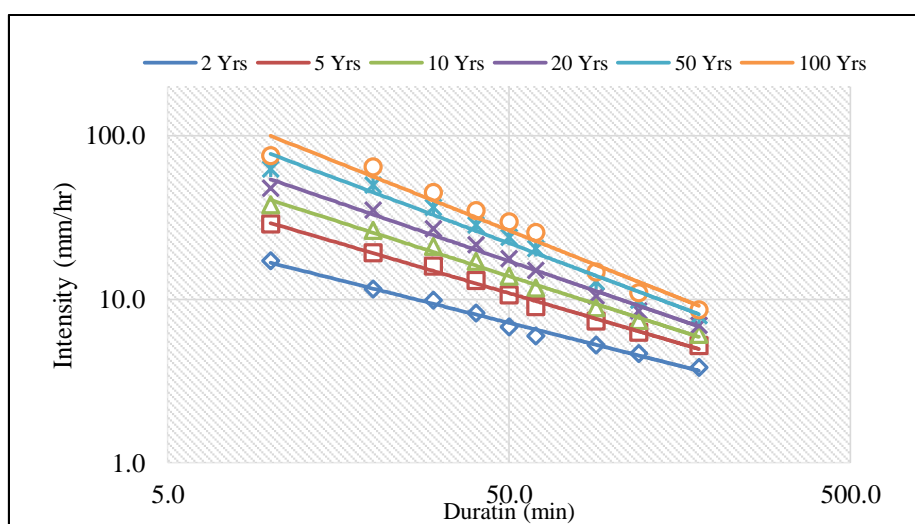
**Fig. 3- Statistical evaluation and ECDF of observed and simulated data**

شکل ۳- ارزیابی آماری و منحنی احتمال تجمعی تجربی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

**Table 2- Depth of rainfall in base period for different return periods**

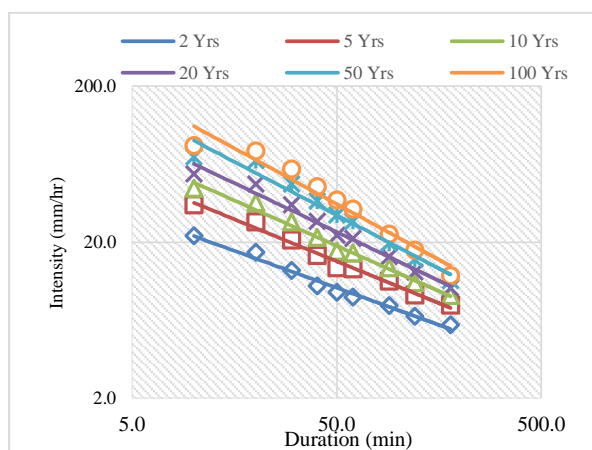
جدول ۲- عمق داده‌های بارش پایه برای دوره بازگشت‌های مختلف

Duration (min)	Depth (mm)					
	Return Period (years)					
	2	5	10	20	50	100
10	2.9	4.8	6.3	8	10.4	12.6
20	3.8	6.4	8.8	11.7	16.6	21.5
30	4.9	7.9	10.5	13.4	18.2	22.5
40	5.5	8.7	11.3	14.3	19	23.1
50	5.6	8.8	11.6	14.8	19.9	24.8
60	6	9	11.7	15	20.4	25.5
90	7.9	11	13.3	15.8	19.2	22.1
120	9.3	12.6	14.8	16.9	19.8	21.9
180	11.5	15.7	18.3	20.7	23.7	25.8



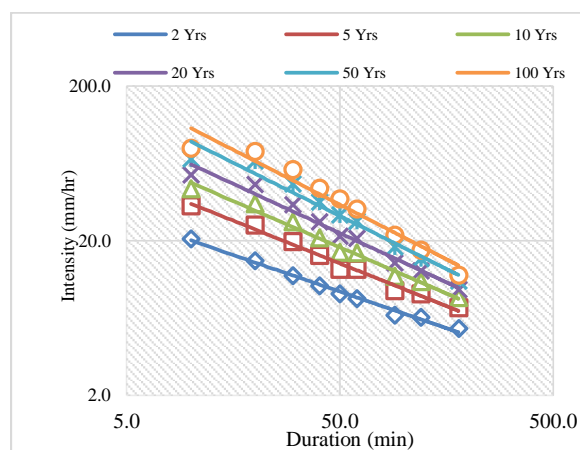
**Fig. 4- IDF curves for base period**

شکل ۴- منحنی شدت مدت فراوانی داده‌های پایه



**Fig. 6- IDF Curves for wet scenario**

شکل ۶- منحنی شدت مدت فراوانی تحت سناریو مرطوب



**Fig. 5- IDF curves for historical scenario**

شکل ۵- منحنی شدت مدت فراوانی تحت سناریو تاریخی

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

این پژوهش با هدف مطالعه عدم قطعیت پیش‌بینی منحنی‌های شدت، مدت و فراوانی ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران در آینده صورت گرفته است. برای دستیابی به هدف پژوهش از مدل WG و مدل تغییر اقلیم منطقه‌ای PRECIS با ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی تحت سناریوی انتشار B2 و روش ریزمقیاس‌نمایی زمانی مبتنی بر داده‌های مشاهداتی استفاده به عمل آمده است. برای ارزیابی عدم قطعیت پیش‌بینی بارش‌های کوتاه مدت برای تولید منحنی‌های IDF از مدل تولید داده‌های آب و هوایی WG و دو مکانیزم برزدن و ایجاد آشفتگی استفاده به عمل آمد و با استفاده از الگوریتم ناپارامتریک این مدل، سری زمانی طولانی مدت مصنوعی و تصادفی از داده‌های آب و هوایی در خارج از محدوده‌ی مشاهداتی ثبت شده تولید گردید. وجه تمایز این پژوهش، ارائه باند اعتماد برای منحنی IDF ایستگاه مهرآباد به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت پیش‌بینی رگبارهای حدی با استفاده از مدل تغییر اقلیم منطقه‌ای و مدل آب و هوایی WG می‌باشد. بدین منظور دو سناریوی اقلیمی تاریخی و مرطوب برای نشان دادن محدوده‌ی تغییرات اقلیم در آینده به کار گرفته شد.

برای ارزیابی عدم قطعیت نتایج پیش‌بینی تغییر شدت رگبارهای حدی، IDF مربوط به حال حاضر، سناریوی تاریخی و مرطوب برای دوره بازگشت دو و صد ساله در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد در تایید نتایج فوق‌الذکر در دوره‌های بازگشت‌های بالا اولاً اختلاف بین منحنی IDF پایه و منحنی IDF تحت سناریوهای تغییر اقلیم تاریخی و مرطوب در روند کلی کمتر می‌شود و ثانیاً با بزرگ شدن دوره بازگشت میزان عدم قطعیت پیش‌بینی شدت رگبارها کمتر می‌شود.

مقایسه‌های انجام شده بین منحنی‌های به‌روزرسانی شده تحت دو سناریو تغییر اقلیم و منحنی شدت-مدت-فراوانی پایه نشان می‌دهد که سناریوی تغییر اقلیم تاریخی حداکثر ۲۶ درصد بالاتر از مقدارهای پایه و سناریو تغییر اقلیم مرطوب حداکثر ۳۱ درصد بالاتر از مقدارهای پایه و ۶ درصد بالاتر از سناریو تغییر اقلیم تاریخی است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که مقدار بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم برای تمام تداوم بارش‌ها و همچنین دوره بازگشت‌ها افزایش یافته است.

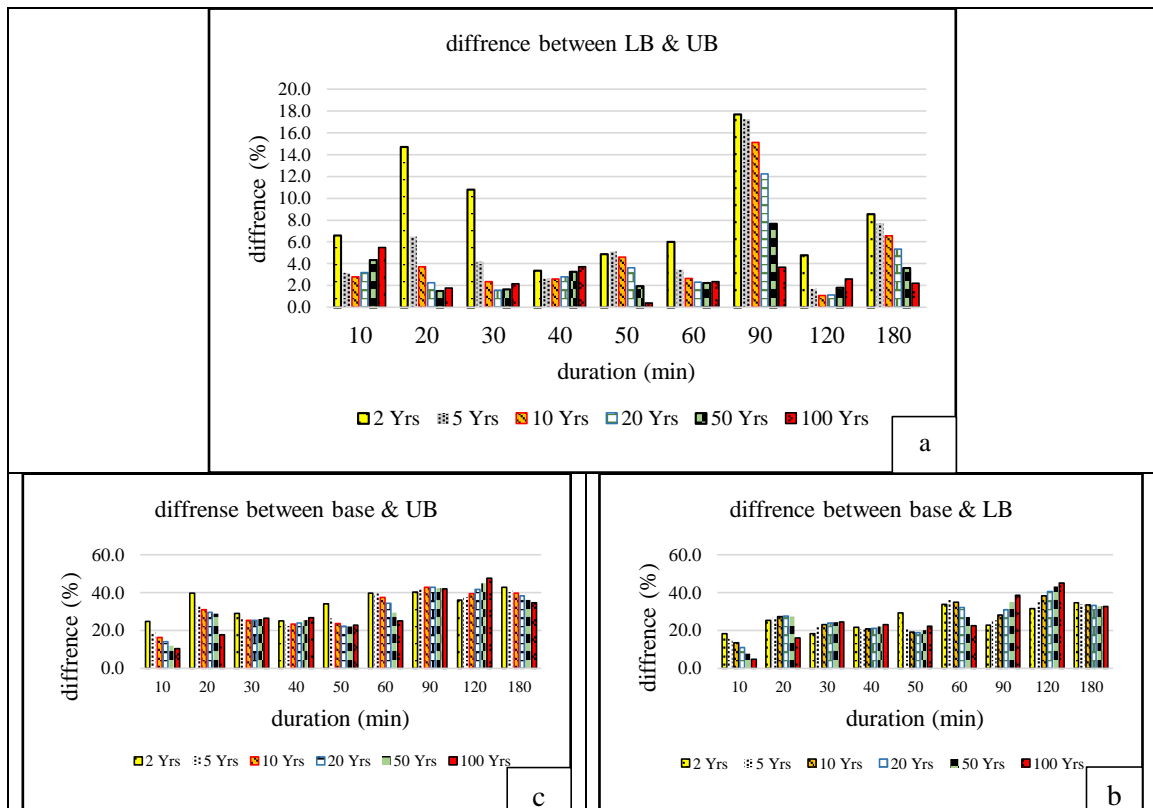
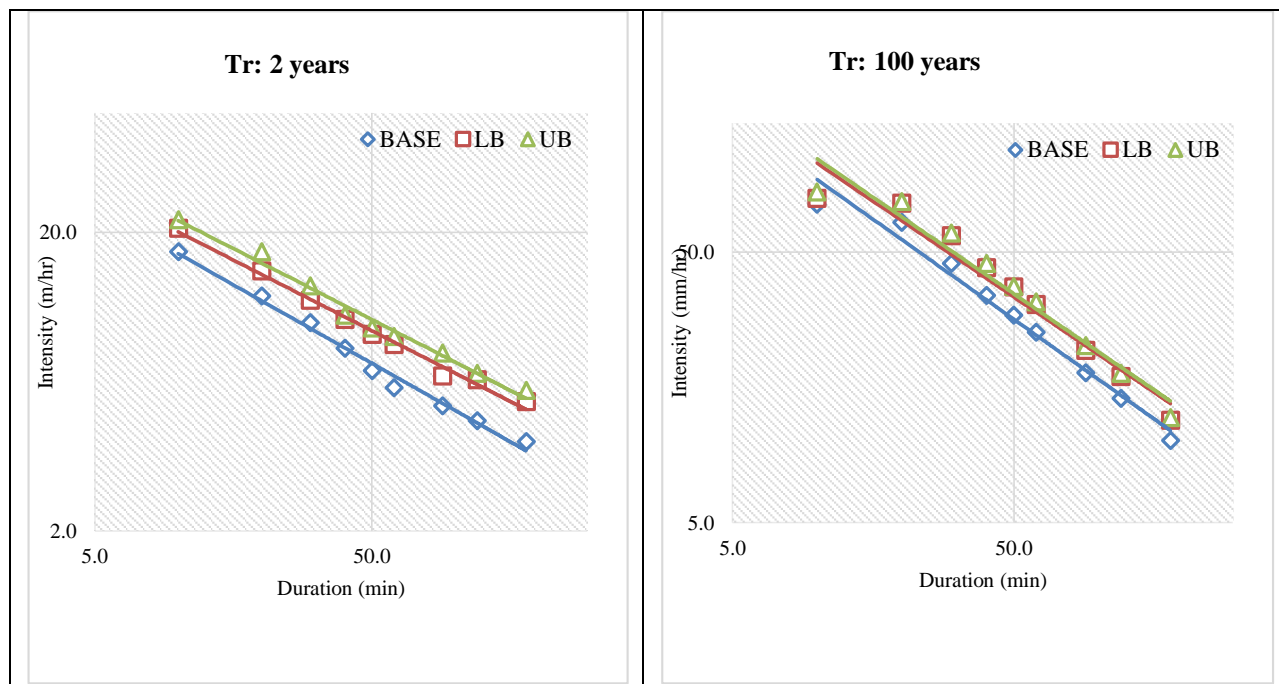


Fig. 7- Difference in the rainfall intensity between: (a) LB and UB- (b) base and UB- (c) base and LB  
 شکل ۷- اختلاف شدت بارش بین حد بالا و پایین (a)، پایه و حد بالا (b)، پایه و حد پایین (c)



**Fig. 8- IDF curves in the base period, historical, and wet scenarios for 2 and 100-year time return**  
**شکل ۸- منحنی شدت مدت فراوانی پایه، سناریوهای تغییر اقلیمی تاریخی و مرطوب در دو دوره بازگشت ۲ و ۱۰۰ سال**

طولانی‌تر، لازم است تغییر استانداردهای طراحی از یک‌طرف و افزایش ظرفیت حمل (rehabilitation) سازه‌های کنترل و مدیریت سیلاب شهر تهران هر چه سریع‌تر مورد توجه قرار گیرد. به طور خلاصه نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- (۱) میزان بارش در آینده دور نسبت به زمان حال متفاوت خواهد بود و این روند برای بارش‌های کوتاه مدت مثبت است.
- (۲) هر دو سناریوی تغییر اقلیم تاریخی و مرطوب نشان‌دهنده‌ی افزایش شدت بارش در تمام تداوم بارش‌ها و دوره بازگشت‌ها در ایستگاه مهرآباد شهر تهران است.
- (۳) با توجه به اینکه در تداوم‌های کمتر از یک ساعت، شدت رگبارهای حدی در دوره‌های بازگشت تا ۱۰ سال متحمل تغییرات شدیدتری خواهند شد، ریسک شکست سازه‌های مورد استفاده برای مدیریت سیل شهری (که دبی طراحی اغلب آنها عموماً محدود به همین دوره بازگشت می‌باشد) را افزایش می‌دهد.
- (۴) تفاضل میان نتایج سناریوهای تاریخی و مرطوب برای اکثر دوره‌های بازگشت و زمان‌های تداوم کم نشان‌دهنده عدم قطعیت کم نتایج حاصل از مدل منطقه‌ای PRECIS برای آینده دور رگبارهای حدی تهران می‌باشد.

تحقیق حاضر با مشکلات عدیده‌ای در راستای تأمین اطلاعات مواجه بود که در صورت رفع آنها می‌توانست نتایج بهتری را به‌دست دهد. دو

براساس متدولوژی توسعه یافته در این تحقیق، از داده‌های پایه برای ایجاد سناریو تاریخی و از داده‌های روزانه مدل PRECIS تحت عنوان سناریو مرطوب و با اعمال دو فاکتور ریزمقیاس‌نمایی زمانی و تغییر زمان به عنوان ورودی مدل WG استفاده شد. نتایج این بخش از پژوهش نشان‌دهنده‌ی افزایش مقادیر و شدت‌های بارش در آینده دور نسبت به حال می‌باشد. نتایج حاصله از این تحقیق به خوبی مؤید نتایج به‌دست آمده توسط دیگر محققین (Habibnejad and Shokoohi, 2020; Al Mamoon et al., 2016; Rodríguez et al., 2014; Mirhosseini et al., 2014; Arnbjerg-Nielsen, 2012; Denault et al., 2002; Waters et al., 2003) می‌باشد. مقایسه بین سناریوی تاریخی و داده‌های پایه تقریباً ۲۶ درصد اختلاف و همچنین مقایسه بین سناریو مرطوب و داده‌های پایه تقریباً ۳۱ درصد اختلاف را نشان دادند. همچنین مقایسه بین سناریو مرطوب و تاریخی به طور میانگین نشان‌دهنده‌ی ۴/۸ درصد اختلاف بین این دو سناریو است. اختلاف کم میان مقادیر حاصل از سناریوی تاریخی به عنوان حد پایین تغییرات و سناریوی مرطوب به عنوان حد بالای تغییرات رگبارهای حدی در آینده اولاً نشان‌دهنده دقت مناسب مدل PRECIS در شبیه‌سازی بارش برای منطقه مطالعاتی است که پیش از این توسط Habibnejad and Shokoohi (2020) تأیید شده بود و ثانیاً نشان‌دهنده قطعی بودن افزایش شدت رگبارهای طراحی مورد استفاده برای مقاصد مدیریت سیلاب شهری می‌باشد. با توجه به افزایش زیادتر بارش‌های حدی با زمان تداوم کمتر از ۱ ساعت نسبت به بارش‌های

for data series and climate projection in African cities. *Journal of Springer Plus* 3(133):1-18

Denault C, Millar RG, Lence BJ (2002) Climate change and drainage infrastructure capacity in an urban catchment. In: Proc. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, 5-6

Fadhel sh, Rico-Ramirez MA, Han D (2017) Uncertainty of intensity-duration-frequency (IDF) curves due to varied climate change baseline periods. *Journal of Hydrology* 547:600-612

Habibnejad R, Shokoohi A (2020) Evaluating intensity, duration, and frequency of short duration rainfalls using a regional climate change model (Case study: Tehran). *Journal of Iran-Water Resources Research* 15(4):412-424 (In Persian)

Hung YF, Mirzaei M, Zaki Mat Amin M (2016) Uncertification in rainfall intensity duration frequency curves based on historical extreme precipitation quantiles. *Procedia Engineering* 154:426-432

IPCC Climate change (2013) The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, chap. 12. Cambridge University Press, Cambridge, 237 pages

Jahangir MH, Norozi E, Yarahmadi Y (2017) Investigation of climate parameters' changes in Borujerd city in the next 20 years through the using HADCM3 model. *ECO Hydrology* 5(4):1345-1353 (In Persian)

King ML, Mcleod AI, Simonovic SP (2015) Improved weather generator algorithm for multisite simulation of precipitation and temperature. *Journal of the American Water Resources Association* 51(5):1305-1320

Kaboli H (2019) 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)

Littell JS, Mauger GS, Salathe EP, Hamlet AF, Lee SY, Matt RS, Marketa E, Robert N, Eric RL, Nathan JM (2014) Uncertainty and extreme events in future climate and hydrologic projections for the Pacific Northwest: providing a basis for vulnerability and core/corridor assessments. Climate Impacts Group

Mailhot A, Duchesne S (2010) Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of Water Resources Planning Manage* 136(2):201-208

Mirhosseini GB, Srivastava P, Stefaanova L (2013) The impact of climate change on rainfall Intensity-

مشکل عمده عبارت بودند از: عدم دسترسی آسان به بارش‌های کوتاه مدت ثبت شده و به‌روز بودن آنها و دیگری مشکل تهیه داده از مدل‌های تغییر اقلیم منطقه‌ای. در راستای بهبود نتایج حاصل از این کار تحقیقاتی توصیه می‌شود که اولاً سازمان هواشناسی کل کشور اطلاعات مربوط به بارش‌های کوتاه مدت را به‌روز نموده و آن را با سهولت بیشتری در اختیار دانش‌پژوهان قرار دهد و ثانیاً با افزایش تعاملات بین‌المللی در وزارتخانه‌های علوم، تحقیقات، فناوری و نیرو شرایط استفاده محققین کشور از نتایج به‌روز شده مدل‌های تغییر اقلیم منطقه‌ای فراهم آید.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Intensity Duration Frequency Curves
- 2- Shuffling
- 3- Perturbation
- 4- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 5- Natural Variability
- 6- Knowledge Deficiency
- 7- Weather Generator
- 8- Model Output Statistics
- 9- Latin Hypercube Sampling
- 10- Lower Band
- 11- Upper Band
- 12- Time Change Factor

## ۵- مراجع

AghaKouchack A, Ragno E, Moftakhari H (2018) Projected change in California's precipitation intensity-duration-frequency curves. California's Fourth Climate Change Assessment, California Energy Commission

Al Mamoon A, Joergensen NE, Rahman A, Qasem H (2016) Design rainfall in Qatar: sensitivity to climate change scenarios. *Natural Hazards* 81(3):1797-1810

Alam MS, Elshorbagy A (2015) Quantification of the climate change-induced variations in Intensity-Duration-Frequency curves in the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology* 527:990-1005

Arnbjerg-Nielsen K (2012) Quantification of climate change effects on extreme precipitation used for high-resolution hydrologic design. *Urban Water Journal* 9(2):57-65

Binesh N, Niksokhan MH, Sarang A (2018) Analysis of climate change impact on extreme rainfall events in the west flood diversion catchment of Tehran. *Journal of Watershed Management Research* 17(9):226-234 (In Persian)

De Paola F, Giugni M, Topa ME, Bucchignani E (2014) Intensity-duration-frequency (IDF) rainfall curves,

- Yücel I (2015) Inter-comparison of statistical downscaling methods for the projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrologic Earth System Science* 19:1827-1847
- Sunyer MA, Madsen H, Rosbjerg D, Arnbjerg-Nielsen K (2014) A Bayesian approach for uncertainty quantification of extreme precipitation projections including climate model interdependency and nonstationary bias. *Journal of Climatology* 27(18):7113-7132
- Shrestha A, Babel MS, Weesakul S, Vojinovic Z (2017) Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves under climate change uncertainty: The case of Bangkok, Thailand. *Water* 9(2):145; <https://doi.org/10.3390/w9020145>
- Thanh NT, Remo LDA (2018) Projected changes of precipitation IDF curves for a short duration under climate change in Central Vietnam. *Journal of Hydrology* 5(33):2-16
- Tung YK, Yen BC (2005) *Hydrosystems engineering uncertainty analysis*. McGraw-Hill, USA, 306p.
- Van Der Linden P, Mitchell JFB (2009) *ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, Exeter
- Waters D, Watt WE, Marsalek J, Anderson BC (2003) Adaptation of a storm drainage system to accommodate increased rainfall resulting from climate change. *Journal of Environmental Planning Manage* 46(5):755-770
- Watt E, Marsalek J (2013) A critical review of the evolution of the design storm event concept. *Canadian Journal of Civil Engineering* 40(2):105-113
- Watt WE, Waters D, McLean R (2003) *Climate variability and urban stormwater infrastructure in Canada: Context and case studies*. Toronto-Niagara Region Study Report and Working Paper Series, Report 2003-1. Meteorological Service of Canada, Waterloo, Ontario
- Willems P (2013) Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology* 496:166-177
- Yates D (2003) A technique for generating regional climate scenarios using a nearest-neighbor algorithm. *Water Resources Research* 39(7):1-15
- Duration-Frequency (IDF) curves in Alabama. *Regional Environmental Change* 13:25-33
- Palmer RN, Clancy E, VanRheenen NT, Wiley MW (2004) *The impacts of climate change on the tualatin river basin water supply: An investigation into projected hydrologic and management impacts*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, Washington
- Peck A, Prodanovic P, Simonovic S (2012) Rainfall intensity duration frequency curves under climate change: The city of London, Ontario, Canada. *Canadian Water Resources Journal* 37(3):177-189
- Prodanovic P, Simonovic S (2008) Intensity duration frequency analysis under changing climatic conditions. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Flood Defense: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability*. Toronto, Ontario, Canada, May 68, 2008, 8 pp
- Prodanovic P, Simonovic S (2006) Assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions: Inverse flood risk modeling of the Upper Thames River basin. Report No. VIII, Department of Civil and Environmental Engineering, the University of Western Ontario, London, Ontario, Canada
- Rodríguez R, Navarro X, Casas MC, Ribalaygua J, Russo B, Pouget L, Redaño A (2014) Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology* 34(3):643-654
- Sarr MA, Seidou O, Trambly Y, El Adlouni S (2015) Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal. *Journal of Hydrology* 4:369-385
- Arfa S, Nasser M (2019) Assessment of Single-site versus Multi-site Downscaling Methods on Estimation of Rainfall Extreme Values. *Journal of the Earth and Space Physics* 45(3):575-597
- Sharif M, Burn DH (2007) Improved k-nearest neighbor weather generating model. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering* 12(1):42-51
- Southam CF, Mills BN, Moulton RJ, Brown DW (1999) The potential impact of climate change in Ontario's Grand River Basin: Water supply and demand issues. *Canadian Water Resources Journal* 24(4):307-330
- Sunyer MA, Hundecha Y, Lawrence D, Madsen H, Willems P, Martinkova M, Vormoor K, Bürger G, Hanel M, Kriauci unien J, Loukas A, Osuch M,