

Investigating the Use of Weather Generator Models Simulation Instead of the Output of Climate Change Models in Predicting Design Precipitation (Case study: Tehran, Mehrabad Station)

R. Habibnejad¹ and A. Shokoohi^{2*}

Abstract

Due to global warming and the occurrence of climate change and its effect on meteorological variables, especially rainfall, which is a key parameter in urban infrastructure design and water resources management, studies in this area are very important. It is now possible to predict future rainfall using the output of climate change models; this is however accompanied by many problems including lack of easy access, being large scale and the need for spatial and temporal micro scaling, increasing error, and imposing risk to urban flood management structures. Therefore, the application of a weather generator model with the ability of climatic models in simulating future precipitation using observational and recorded data has been considered in this research. In the present study, the non-parametric K-NN WG model was used which produces data outside the observational range by using two mechanisms of shuffling and perturbing. In this model, observational short-term precipitation data of Mehrabad station with a time duration of 10 minutes to 3 hours were used to predict short-term precipitation in the future. The results were compared with the output of the PRECIS regional climate model for the years 2070-2100 under emission scenarios A2 and B2. The results showed an increase in the intensity of future precipitation compared to the present time and moreover proved the capability of the WG model used in the study compared to the output of the PRECIS regional model. These results were evaluated using appropriate statistical tests.

Keywords: Design Storm, Climate Change, WG Model, Perturbation, PRECIS.

Received: July 10, 2021

Accepted: October 17, 2021

بررسی استفاده از شبیه‌سازی مدل‌های آب و هوایی در پیش‌بینی بارش‌های طراحی به جای برون‌داد مدل‌های تغییر اقلیم

(مطالعه موردی: تهران، ایستگاه مهرآباد)

رویا حبیب‌نژاد^۱ و علیرضا شکوهی^{۲*}

چکیده

با توجه به گرم شدن زمین و بروز پدیده تغییر اقلیم و اثر آن بر متغیرهای هواشناسی بخصوص بارش‌های حدی که پارامتر اساسی در طراحی زیرساخت‌های شهری و مدیریت منابع آب است، مطالعات در این حوزه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در حال حاضر، پیش‌بینی بارش‌های آینده با استفاده از برون‌داد مدل‌های تغییر اقلیم امکان‌پذیر می‌باشد که با مشکلات عدیده‌ای منجمله عدم دسترسی آسان، بزرگ مقیاس بودن و نیاز به ریزمقیاس‌نمایی مکانی و زمانی، افزایش خطا و تحمیل ریسک بالا به سازه‌های مدیریت سیل شهری، روبرو می‌باشند. لذا، بکارگیری مدل تولید داده آب و هوایی که با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای و ثبت شده توانایی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش‌های آینده را داشته باشد، مورد توجه این پژوهش قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، مدل ناپارامتری K-NN WG بکار گرفته شد که با استفاده از دو مکانیزم برزدن و ایجاد آشفستگی اقدام به تولید داده‌هایی خارج از محدوده مشاهده‌ای می‌نماید. در این مدل از داده‌های بارش کوتاه‌مدت مشاهده‌ای ایستگاه مهرآباد با تداوم‌های ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت برای پیش‌بینی بارش کوتاه‌مدت در آینده استفاده شد و نتایج آن با خروجی مدل اقلیمی منطقه‌ای PRECIS برای سال‌های ۲۱۰۰-۲۰۷۰ تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 مقایسه گردید. نتایج، اولاً نشان‌دهنده افزایش شدت بارش‌های آینده نسبت به حال و ثانیاً اثبات‌کننده توانمندی مدل تولید داده آب و هوایی مورد استفاده در پژوهش در مقایسه با برون‌داد مدل منطقه‌ای PRECIS می‌باشد. این نتایج با استفاده از آزمون‌های آماری مناسب ارزیابی شد.

کلمات کلیدی: بارش طراحی، تغییر اقلیم، موتور تولید داده WG، آشفستگی، PRECIS.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۵

1- M.Sc. Graduate Student, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.13.8](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.13.8)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره).

۲- استاد دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آب، قزوین، ایران، کد پستی: ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکان‌پذیر است.



مدل‌ها، توصیف عملکرد سیستم اقلیمی در سلول‌های سه‌بعدی با استفاده از علوم پایه مانند فیزیک، مکانیک سیالات، شیمی و غیره است (Kolbert, 2006). تاکنون مدل‌های گردش عمومی مختلفی در مراکز مختلف تحقیقاتی ارائه شده است. از جمله آنها می‌توان به UKMO، GISS، GFDL، GFDLT، ECHAM4، HadCM2 و HadCM3 اشاره داشت (Massah Bavani and Morid, 2005). این در حالی است که پیش‌بینی‌های اقلیمی با مشکلاتی زیاد همچون بزرگ مقیاس بودن زمانی و مکانی مدل‌های گردش عمومی جو و مناسب نبودن آنها برای مطالعات منطقه‌ای و حوضه‌های با مساحت کم، خطای ناشی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی و عدم قطعیت ذاتی، عدم دسترسی آسان به داده‌های جدید و به روز (به‌ویژه برای محققین ایرانی) مواجه‌اند (Palmer et al., 2004; Southam et al., 1999; Coulibaly and Dibike, 2004; Mailhot and Duchesne, 2010; Habibnejad and Shokoohi, 2020). ابعاد هر سلول شبکه در مدل‌های گردش عمومی جو تقریباً ۲ در ۲/۵ درجه می‌باشد که در برخی از مطالعات اثرات تغییر اقلیم نظیر آنچه که در این پژوهش مطرح می‌باشد، با توجه به وسعت منطقه مطالعاتی، مطلوب نیست. مطالعات سیلاب‌های شهری برای بسیاری از مقاصد طراحی نیازمند استفاده از منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی و لذا داده‌هایی با قدرت تفکیک زمانی بالا در حد دقیقه می‌باشد (Habibnejad and Shokoohi, 2013; Mirhosseini et al., 2020). پژوهشگران برای مقابله با مشکل بزرگ مقیاس بودن این مدل‌ها از نظر مکانی (بیشتر از صد کیلومتر) و زمانی (ماهانه) و به منظور بالا بردن دقت برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌نمایند (Ghalhori et al., 2018; Malwila et al., 2015). این روش‌ها به دو دسته کلی آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند. در روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی عموماً اطلاعات اقلیمی با دقت بسیار بالا و با استفاده از مدل‌های منطقه‌ای مشتق شده از GCM، ریزمقیاس می‌شوند. این در حالی است که در روش‌های آماری از نسبت بین ویژگی‌های اقلیمی حاصل از GCM به داده‌های اقلیمی مشاهداتی استفاده می‌شود (Wilby and Wigley, 1997; Sharghi et al., 2020). علی‌رغم قدرت تفکیک مکانی و زمانی بسیار مناسب خروجی (گام‌های زمانی و مکانی ریزتر و دقیق‌تر) و عدم نیاز به داده‌های مشاهداتی و ایستگاهی بلندمدت در روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی، روش‌های محاسباتی گسترده، استفاده از الگوهای فیزیکی برای تولید داده‌های اقلیمی محلی، نیاز به رایانه‌هایی با سرعت بسیار بالا و تجربه و تخصص در سطح بالا برای تفسیر نتایج و بالآخره زمان‌بر بودن ریزمقیاس‌نمایی از جمله محدودیت‌های استفاده از این روش می‌باشد (Benestad, 2004; Danandeh Mehr and

در چند دهه اخیر، استفاده از مولدهای تولید داده^۱ به منظور تولید پارامترهای هواشناسی مانند دما، بارش و غیره با هدف شبیه‌سازی سری زمانی طولانی مدت از داده‌های مزبور که پایه و اساس بسیاری از مطالعات مختلف از جمله اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی، وقایع حدی، سیلاب‌ها و غیره را شامل می‌شود، مورد توجه بسیاری از محققین (Simonovic and Prodonovic, 2006-2008; Sharif and Peck et al., 2014; Burn, 2006-2008) قرار گرفته است. این مدل‌ها با دو رویکرد پارامتری و ناپارامتری داده‌های مورد نیاز را شبیه‌سازی و تولید می‌نمایند. فرض اساسی و مهم نوع پارامتری، تولید داده با استفاده از توابع توزیع احتمالاتی داده‌های تاریخی است. نوع ناپارامتری مدل‌های مزبور به دلیل در نظر نگرفتن این فرض و همچنین تولید داده خارج از مرز داده‌های مشاهداتی بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. امروزه، تغییر اقلیم یکی از بزرگترین چالش‌های پیش‌روی محیط زیست، اجتماع و اقتصاد است. تغییر اقلیم اثرات شدیدی بر منابع آب، کشاورزی، انرژی، دما و به‌طور خاص بر توزیع زمانی و مکانی بارش و همچنین بارش‌های حدی و به‌دنبال آن با افزایش وقایع حدی، مدیریت سیلاب‌ها داشته است (Hashmi et al., 2013; Mirhosseini et al., 2009; al.). شناخت و درک بهتر از این پدیده و برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری آگاهانه به همراه اطلاعات و دانش کافی، موجب افزایش سازگاری جوامع با این پدیده و مدیریت بهتر منابع آب به‌طور عام و مدیریت سیلاب به‌طور خاص می‌شود (IPCC, 2014; Hashmi et al., 2009; Simonovic and Prodonovic, 2006-2008; Kaboli, 2016). در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم در طراحی‌ها به منظور حفظ پایداری طولانی مدت انواع سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در بیشتر مطالعات صورت گرفته در جهان و ایران در خصوص اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های طراحی بر افزایش مقدار و شدت این بارش‌ها تأکید شده است (Fadhel et al., 2017; Aghakouchack et al., 2018; Thanh and Remo, 2018; De Paola et al., 2014; Prodanovic and Simonovic, 2008, 2006; Jahangir et al., 2017; Binesh et al., 2017; Haidari and Khazaie, 2016; Habibnejad and Shokoohi, 2020). آنجا که در طراحی هرگونه سازه جمع‌آوری و کنترل سیلاب شهری از بارش‌های حدی که اساس استخراج منحنی‌های شدت مدت فراوانی می‌باشند، استفاده می‌شود اطلاع دقیق از الگوی زمانی و مکانی این بارش‌ها و تغییرات آن‌ها در آینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Sharif and born, 2006-2008; Peck et al., 2012). در حال حاضر، ابزار محققین برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های طراحی استفاده از مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای مختلف است (Arnel, 1996; Wilby and Harris, 2006; Mitchell, 2003;)

قدرت تفکیک زمانی روزانه برای ایستگاه سینوپتیک مهرآباد در کلانشهر تهران می‌باشد. موتور تولید داده K-Nearest Neighbor Weather Generator که از این پس بطور اختصار K-NN WG نامیده می‌شود، از دو مکانیزم برزیدن^۲ به منظور تولید داده‌های مصنوعی مشابه داده‌های مشاهداتی و مکانیزم ایجاد آشفتگی^۳ به منظور ایجاد داده‌های شبیه‌سازی شده خارج از مرزهای داده‌های مشاهداتی استفاده می‌کند. همان‌طور که ذکر شد هدف این، پژوهش ارزیابی امکان استفاده از داده‌های مشاهداتی و مدل K-NN WG برای پیش‌بینی تغییرات بارش در آینده دور بجای استفاده از شبیه‌سازی مدل منطقه‌ای PRECIS با هدف غلبه بر مشکلات ریزمقیاس‌نمایی، خطا و عدم قطعیت ناشی از آن و به‌خصوص عدم دسترسی محققین ایرانی به داده‌های بروز این مدل‌های نسبتاً دقیق می‌باشد.

در اینجا با توجه به هدف مهم پژوهش به ذکر مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در خصوص اثرات تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی و پیش‌بینی آنها و همچنین استفاده از مدل WG پرداخته می‌شود. مدل توسعه یافته K-Nearest Neighbor Weather Generator با مکانیزم ایجاد آشفتگی را (Sharif et al., 2006) در حوضه رودخانه تایمز انتاریو اجرا نمودند. نتایج ایشان حاکی از توانمندی این مدل در تولید داده‌های مشاهده نشده بود. منحنی‌های IDF منطقه‌ای در دانمارک را (Madsen et al., 2009) با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش طی دوره ۱۹۹۷-۲۰۰۵ به علت افزایش شدت رگبارها مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه منحنی به روز شده با منحنی‌های موجود نشان‌دهنده بیش از ۱۰ درصد اختلاف در شدت‌های بارش برای بارش‌های ۳۰ دقیقه تا ۳ ساعت و دوره بازگشت ۱۰ ساله بود. ارزیابی تغییرات رویدادهای اقلیمی حدی در حوضه رودخانه تایمز کانادا را (Hyung-II Eum et al., 2012) به مورد مطالعه قرار دادند. ایشان از مدل Weather Generator برای تولید سری زمانی روزانه از سه متغیر اقلیمی برای دو سناریوی اقلیمی آینده و استخراج حداکثر بارش سالانه برای مدت زمان‌های ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ ساعت استفاده نمودند. نتایج نشان داد که رویدادهای بارش حدی تحت تاثیر تغییر اقلیم زودتر از گذشته اتفاق می‌افتد و لذا بازنگری در مقدار بارش طراحی (به عنوان مثال دوره‌های بازگشت ۱۰۰ یا ۲۵۰ ساله) حوضه مورد مطالعه ضروری می‌باشد. در مطالعه‌ای دیگر منحنی‌های IDF شهر لندن در انتاریو کانادا تحت تأثیر تغییر اقلیم توسط (Peck et al., 2012) مورد بررسی قرار گرفت. آنها از الگوریتم ناپارامتریک K-Nearest Neighbor Weather Generator برای ایجاد سری زمانی طولانی مدت از داده‌ها و برای ورودی مدل، از نه سری داده حداکثر بارش روزانه با تداوم بارش ۵، ۱۰، ۱۵، ۳۰ دقیقه، ۱، ۲، ۶، ۱۲ و ۲۴ ساعته در دوره زمانی ۲۰۰۲-۱۹۶۱ تحت دو سناریوی تغییر اقلیم استفاده نمودند. در

(Kahya, 2016; Rahimi et al., 2018; Sharghi et al., 2020) از انواع مدل‌های دینامیکی می‌توان به RegCM و PRECIS اشاره نمود. در روش‌های آماری نیز با یافتن رابطه بین خروجی GCM و داده‌های اقلیمی مشاهداتی ریزمقیاس‌نمایی صورت می‌گیرد. از انواع روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری می‌توان به MET & ROLL، CLOMGEN و SDSM به عنوان روش‌های معمول اشاره داشت. در بسیاری از مطالعات اقلیم‌شناسی این روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Semenov et al., 1998; Mitchell, 2003). پژوهشگران با توجه به هدف و نوع منطقه مطالعاتی یکی از روش‌های مذکور را انتخاب می‌نمایند. نتایج حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو برحسب نوع روش‌های ریزمقیاس‌نمایی زمانی و مکانی همواره با درجاتی از خطا و عدم قطعیت رو به رو می‌باشد (Watt et al., 2003; Fadhel et al., 2017; Willems, 2013; Habibnejad and Shokoochi, 2020). محققین به منظور مقابله با عدم قطعیت ذاتی مدل‌های گردش عمومی از روش‌هایی مانند ترکیب مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای تحت سناریوهای انتشار و یا تابشی مختلف (Van Der Linden and Mitchell, 2009; Sarr et al., 2015; Sunyer et al., 2014; Alam and Elshorbagy, 2015; Rodriguez et al., 2013; Mirhosseini et al., 2014)، استفاده از ضریب بایاس (Fadhel et al., 2017)، تعیین باند اطمینان و استفاده از موتور تولید داده مصنوعی WG (Peck et al., 2014; Habibnejad and Shokoochi, 2020) استفاده نموده‌اند. یکی از ایرادهای مهم و اساسی GCMها که مورد توجه پژوهش حاضر نیز می‌باشد، عدم توانایی آنها در تولید داده‌های حدی است (Peck et al., 2014; Simonovic and Prodonovic, 2006-2008; Habibnejad and Shokoochi, 2020). این مسئله در شرایط تغییر اقلیم که موجب افزایش فراوانی و به عبارت بهتر بزرگی وقایع حدی شده، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، اگر بتوان روشی را جایگزین نمود تا با استفاده از داده‌های مشاهداتی و ثبت شده، پارامترهای اقلیمی در آینده دور را پیش‌بینی نمود به نحوی که روش مزبور بتواند با خطای بسیار کم و حتی بهتر از مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای عمل نماید، کمک بسیار شایانی به محققین در زمینه پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی شده است. پژوهش حاضر بر همین اساس صورت گرفته و بنا دارد با استفاده از داده‌های مشاهداتی و ثبت شده ایستگاه مهرآباد تهران طی سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۵۹ و مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 و همچنین موتور تولید داده ناپارامتری K-Nearest Neighbor Weather Generator این مدعا را اثبات نماید. کارآیی و توانمندی دو مدل مزبور پیشتر در تحقیقی توسط (Habibnejad and Shokoochi, 2020) بر روی داده‌های ایستگاه مهرآباد مورد تأیید قرار گرفته است. مدل منطقه‌ای PRECIS مورد استفاده در پژوهش دارای قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۵۰ کیلومتر و

انتشار A2 تحت تاثیر تغییر اقلیم توسط Safavi et al. (2015) مورد بررسی قرار گرفت. ایشان نتایج خود را در سه دوره زمانی تاریخی (۱۹۹۳-۱۹۶۷)، دوره حاضر (۲۰۱۴-۱۹۹۴) و دوره پیش‌بینی (۲۰۳۵-۲۰۱۵) ارائه دادند. نتایج ایشان نشان داد که در دوره حاضر و دوره پیش‌بینی به دلیل پدیده تغییر اقلیم، شدت‌های بارش با تداوم‌های کوتاه‌مدت افزایش یافته و در واقع منحنی‌های IDF تا ۵۲ درصد به سمت بالا جا به جا شده‌اند. اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی حوضه سد شاهچراغی واقع در استان سمنان را با استفاده از مدل CGCM3 تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG توسط Bani-habib et al. (2015) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ایشان نشان داد که متوسط دمای حداقل و حداکثر در آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱/۱۵ و ۱/۲۱ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داشت.

با توجه به اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی و به‌خصوص منحنی‌های IDF که در بسیاری از طراحی‌ها از آن استفاده می‌شود و همچنین وجود مشکلات در استفاده از پیش‌بینی مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای، نیاز به ارائه روش مناسب با این خاصیت که بدون نیاز به استفاده از داده‌های GCM بتوان بارش‌های حدی را برای آینده دور و نزدیک تولید نماید، دیده می‌شود. هدف مهم تحقیق حاضر، غلبه بر مشکلات مدل‌های گردش عمومی و منطقه‌ای با استفاده از داده‌های مشاهداتی و اجرای مدل K-NN WG و مقایسه نتایج آن با نتایج مدل منطقه‌ای PRECIS می‌باشد. بدون شک دستیابی به این هدف مهم کمک بسیار شایانی برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در آینده به پژوهشگران می‌نماید. در روش ارائه شده در این تحقیق که برای اولین بار ارائه می‌گردد از داده‌های مشاهداتی و ثبت شده ایستگاه مهرآباد با تداوم‌های ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت، مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 و مدل تولید داده K-NN WG استفاده شد و برای ارزیابی روش ارائه شده خروجی مدل منطقه‌ای PRECIS با نتایج مدل K-NN WG برای طیف وسیعی از بارش‌های کوتاه‌مدت و حدی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، این مقاله به ارزیابی عملکرد مدل تولید داده K-NN WG در تولید داده‌های بارش حدی در مقایسه با پیش‌بینی‌های مدل منطقه‌ای PRECIS با استفاده از داده‌های بارش کوتاه‌مدت ثبت شده در ایستگاه مهرآباد پرداخته است. پیاده‌سازی این روش بر اساس شبیه‌سازی بارش در آینده و استخراج منحنی‌های IDF می‌باشد. مبنای اصلی این تحقیق پژوهشی است که Habibnejad

این تحقیق، سناریوی اول از داده‌های مشاهداتی و سناریوی دوم از ضرب داده‌های مشاهداتی در فاکتور تغییر به دست آمده از داده‌های ریزمقیاس شده GCM در ورودی مدل استفاده می‌کرد. آنها از خروجی هر دو سناریو برای ایجاد منحنی IDF استفاده نمودند. نتایج نشان داد که شدت و مقدار بارش در آینده افزایش خواهد داشت که براساس نظر محققین مزبور پیامدهای زیادی در زمان حال و آینده در طراحی و نگهداری زیرساخت‌های مدیریت آب شهری دارد. روش‌های موجود در تخمین منحنی شدت-مدت- فراوانی را Cheng et al. (2014) مورد بازبینی قرار دادند. ایشان نشان دادند که روش‌های مزبور مقدار بارش‌های حدی آینده را کمتر از مقدار واقعی تحت تاثیر پدیده‌ی تغییر اقلیم برآورد می‌کنند. کمتر برآورد کردن مقدار بارش حدی در طراحی‌های منابع آبی موجب افزایش ۶۰ درصدی خطر سیل در سیستم‌های مدیریت منابع آب می‌شود. (Ailliot et al. (2015) در یک مطالعه مروری از مدل‌های Weather Generator ضمن شرح مفاهیم اصلی مدل مزبور، مزایا و محدودیت‌های هر یک را برشمردند. در مطالعه‌ای Ghamghami et al. (2011) به بررسی کاربرد یک روش ناپارامتری مبتنی بر بازنمونه‌گیری هدفمند از سری‌های مشاهده شده در شبیه‌سازی داده‌های روزانه دما و بارش برای پنج ایستگاه تهران، مشهد، بوشهر، قزوین و تبریز به‌صورت تک مکانی پرداختند. نتایج نشان دهنده قابلیت کاربرد این روش در شبیه‌سازی متغیرهای بارش و به‌خصوص دما می‌باشد. تغییرات اقلیمی ایران در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ با استفاده از مدل اقلیمی منطقه‌ای PRECIS توسط Babaeian et al. (2010) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آن‌ها شبیه‌سازی‌ها را ابتدا برای دو دوره آینده ۲۱۰۰-۲۰۷۱ و دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ اجرا کردند و خروجی‌های بارش و دمای آن را به صورت ماهانه، فصلی و سالانه استخراج کردند. نتایج ایشان در مورد بارش نشان داد که بارش در دو منطقه زاگرس غربی و سواحل جنوب شرقی به‌طور شدیدی کاهش می‌یابد. این در حالی است که مقدار بارش در سایر نقاط افزایش یافته یا بدون تغییر خواهند ماند. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب با استفاده از مدل‌های اقلیمی توسط Sadeghirad et al. (2010) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی ایشان نشان داد که این مدل‌ها در کوتاه‌مدت شبیه‌سازی مناسبی ندارند ولی در بازه‌های زمانی بالای ۱۰ سال شبیه‌سازی قابل قبولی ارائه می‌دهند. تغییرات دما و بارش با استفاده از خروجی مدل HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A1B، A2 و B2 و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG توسط Kordjazi et al. (2012) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ایشان نشان داد که میانگین دما در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت. همچنین، بارش‌های سنگین و خیلی سنگین سالانه در آینده به ترتیب ۲۴ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. منحنی‌های IDF اصفهان با استفاده از تئوری فرکتال و مدل‌های سه بعدی گردش عمومی جو تحت سناریو

and Shookohi (2020) روی داده‌های بارش کوتاه‌مدت ایستگاه مهرآباد انجام داده‌اند. ایشان از داده‌های بارش ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت در دوره ۱۹۹۹-۱۹۵۹ و داده‌های پیش‌بینی مدل PRECIS در دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۰ و دوره پیش‌بینی ۲۰۷۰-۲۱۰۰ استفاده نمودند.

به‌طور خلاصه گام‌های اصلی پژوهش را می‌توان در دو بخش بکارگیری مدل PRECIS و K-NN WG به شرح زیر خلاصه نمود:

(۱) جمع‌آوری داده‌های بارش کوتاه‌مدت ایستگاه مهرآباد از ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت طی دوره ۱۹۹۹-۱۹۵۹ (از سازمان هواشناسی کل کشور)؛

(۲) تست آزمون روند و جهش و تعیین سال جهش و تأیید روند افزایشی در داده‌های بارش کوتاه‌مدت در تمام تداوم‌ها؛

(۳) استفاده از داده‌های پس از سال جهش (سال ۱۹۷۸ میلادی) به منظور در نظر گرفتن اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی و پرهیز از استفاده از داده‌های قبل از جهش؛

(۴) جمع‌آوری داده‌های ریزمقیاس شده مکانی مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 در دو دوره پایه و پیش‌بینی از سازمان متولی این مدل در مرکز هادلی؛

(۵) ریزمقیاس‌نمایی زمانی داده‌های مدل منطقه‌ای PRECIS با روش جدید و مبتنی بر ویژگی‌های آماری؛

(۶) تولید بارش‌های حدی از روی داده‌های مشاهداتی و مدل منطقه‌ای PRECIS؛

(۷) پیاده‌سازی مدل K-NN WG با دو مکانیزم برزیدن و ایجاد آشفستگی برای دو نوع داده ورودی: **الف) ورودی نوع اول:** داده‌های بارش مشاهداتی و اعمال هر دو مکانیزم برزیدن و ایجاد آشفستگی، **ب) ورودی نوع دوم:** داده‌های بارش مدل PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 (تغییر یافته با فاکتور تغییر) و فقط اعمال مکانیزم برزیدن؛

(۸) ایجاد منحنی IDF براساس خروجی مدل KNN-WG برای هر دو نوع داده ورودی؛

(۹) ارزیابی عملکرد مدل PRECIS و مدل K-NN WG با استفاده از آزمون‌های آماری

روش پیشنهادی در تحقیق حاضر، شامل دو نوع داده ورودی به مدل K-NN WG می‌باشد. ورودی نوع اول که شامل داده‌های مشاهداتی ایستگاه مهرآباد به‌صورت جداگانه (هر تداوم بارش) بوده و مدل با اجرای دو مکانیزم قدرتمند برزیدن و ایجاد آشفستگی بر روی آنها، داده‌های مصنوعی را ایجاد می‌کند که علاوه بر اینکه مشابه داده‌های مشاهداتی می‌باشند، دارای داده‌هایی خارج از محدوده مشاهداتی نیز

می‌باشد که ممکن است در آینده رخ بدهند. کاری که مدل در واقع انجام می‌دهد، ایجاد جهش در داده‌ها نظیر اتفاقی است که در دنیای واقعی بر اثر تغییر اقلیم رخ داده است. ورودی نوع دوم، داده‌های ریزمقیاس شده زمانی و مکانی مدل دینامیکی PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 می‌باشد. در این نوع داده، تنها از مکانیزم برزیدن به منظور ایجاد داده‌های مصنوعی به تعداد زیاد ولی مشابه آنچه که مدل منطقه‌ای PRECIS پیش‌بینی نموده، استفاده می‌شود. عملکرد این بخش از مدل از نظر آماری در واقع همان کاری است که در تولید داده با روش randomization یا bootstrap صورت می‌گیرد. پس به‌طور خلاصه می‌توان گفت که مدل برای دو نوع داده اجرا شده و خروجی آن شامل: (۱) Base Modified: خروجی مدل K-NN WG با ورودی نوع اول (داده‌های مشاهداتی و اعمال مکانیزم‌های برزیدن و ایجاد آشفستگی)، (۲) A2 Modified و B2 Modified: خروجی مدل K-NN WG با ورودی نوع دوم (داده‌های ریزمقیاس شده مکانی و زمانی مدل منطقه‌ای PRECIS و اعمال مکانیزم برزیدن) می‌باشد.

۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های بارش

ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران که داده‌های بارش کوتاه‌مدت از جمله داده‌هایی است که در آن ثبت می‌شود، 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 ۱ 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. دوره پایه مربوط به سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۶۰ و دوره پیش‌بینی با استفاده از مدل منطقه‌ای PRECIS با ریزمقیاس‌نمایی مکانی دینامیکی مربوط به سال‌های ۲۰۷۰-۲۱۰۰ و تحت سناریوهای انتشار B2 و A2 در مقیاس زمانی روزانه می‌باشد. اطلاعات مربوط به دوره زمانی و سناریوهای یاد شده از سازمان متولی این مدل در مرکز هادلی انگلستان (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.

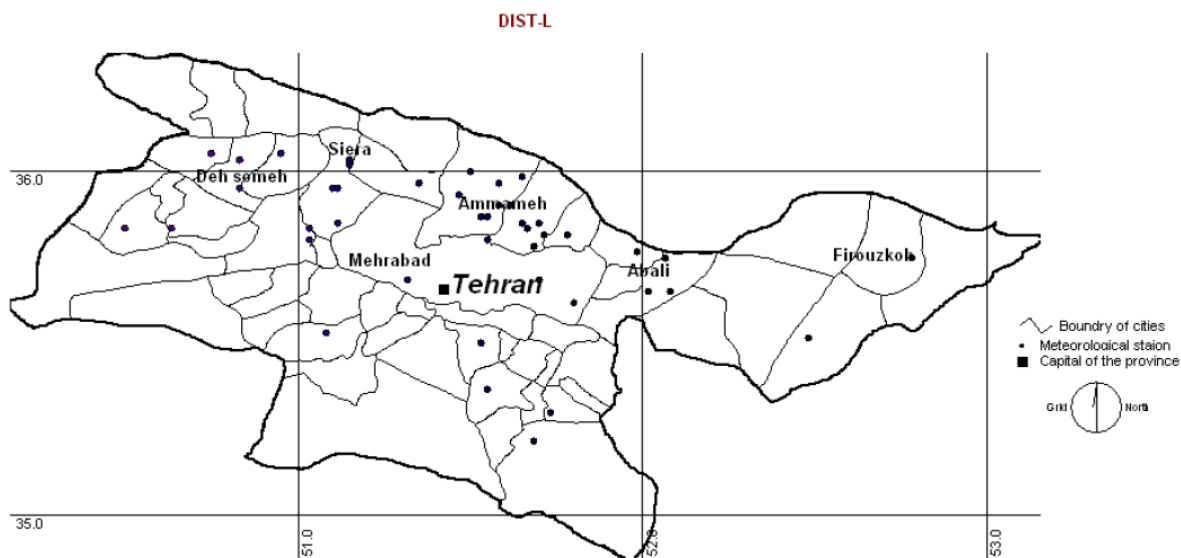


Fig. 1- Location of the Mehrabad synoptic station- Tehran (adopted from: Akhtari et al., 2007)
 شکل ۱- موقعیت ایستگاه هواشناسی مهرآباد- تهران (مأخذ: اختری و همکاران، ۱۳۸۵)

روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های آماری داده‌های مشاهداتی استفاده شده است (Habibnejad and Shokoochi, 2020). ریزمقیاس‌نمایی مکانی که با استفاده از مدل PRECIS به‌طور اتوماتیک انجام می‌شود و روش ریزمقیاس‌نمایی زمانی با یک مثال شرح داده می‌شود. فرض نمایید که در وقایع ثبت شده، بارشی در یک روز از سال ۱۹۷۸ رخ داده که از ساعت ۱۷:۳۰ تا ۲۰:۳۰ ادامه داشته و میزان کل آن معادل ۵/۳ میلی‌متر بوده است. حال اگر هدف دستیابی به رابطه بارش ۱۰ دقیقه‌ای و روزانه باشد، ابتدا 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 ده دقیقه‌ای در کل دوره آماری یعنی سال‌های ۱۹۷۸-۱۹۹۰ تکرار می‌شود و سپس از همه نسبت‌های بدست آمده میانگین‌گیری می‌شود. در مطالعه حاضر، ضریب تبدیل بارش روزانه به تداوم بارش ۱۰ دقیقه، مقدار ۰/۲ به دست آمد (جدول ۲). این مقدار در داده‌های پایه و پیش‌بینی تولید شده توسط مدل PRECIS در مقیاس روزانه ضرب می‌شود تا بارش با تداوم‌های مورد نظر ایجاد شود.

۲-۳- مدل K-NN WG

مدل K-Nearest Neighbor Weather Generator که در این تحقیق به اختصار K-NN WG نامیده می‌شود، شامل الگوریتم‌های شبیه‌سازی تصادفی است که قادر به تولید سری زمانی طولانی مدت از داده‌های اقلیمی می‌باشند. این مدل از الگوریتم‌های ریاضی برای تولید داده بر اساس الگوهای بارش مشاهداتی استفاده می‌نماید. مدل

۲-۲- مدل منطقه‌ای PRECIS و ریزمقیاس‌نمایی زمانی

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در مقیاس کوچک نظیر یک منطقه شهری با استفاده از مدل‌های گردش عمومی و یا منطقه‌ای در درجه اول نیازمند ریزمقیاس‌نمایی مکانی و بسته به کاربرد نیازمند ریزمقیاس‌نمایی زمانی برون‌داد مدل‌های مزبور می‌باشد. متغیرهای اقلیمی در مقیاس جهانی توسط مدل‌های GCM پیش‌بینی می‌شوند. این مدل‌ها نمایش عددی سیستم‌های اقلیمی را بر اساس خواص فیزیکی، شیمی و بیولوژیکی اجزای آنها و بازخورد اثرات متقابل فراهم می‌نمایند (Kolbert, 2006). در حال حاضر این مدل‌ها ابزار بسیار قدرتمند و قابل اطمینان جهت پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی در آینده (بارش، دما، فشار، سرعت باد و غیره) می‌باشند. در پژوهش حاضر از مدل اقلیمی منطقه‌ای PRECIS در دوره‌های تاریخی یاد شده و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر برای مقیاس مکانی استفاده شده است.

همان‌طور که اشاره شد، برای مطالعات هیدرولوژیکی به خصوص برای تهیه منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی نیاز به داده‌هایی با قدرت تفکیک زمانی در حد چند دقیقه تا چند ساعت است. برون‌داد مدل‌های گردش عمومی معمولاً قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسبی برای این گونه مطالعات ندارند. به همین دلیل، محققین برای دستیابی به داده‌های با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌نمایند (Palmer et al., 2004; Southam et al., 1999; Coulibaly and Dibike, 2004; Mirhosseini et al., 2013). در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس کردن مکانی از روش دینامیکی و برای ریزمقیاس‌نمایی زمانی از

۲-۴- ورودی مدل K-NN WG

در این مطالعه برای بررسی و امکان‌سنجی جایگزینی مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل K-NN WG با استفاده از داده‌های مشاهداتی بجای خروجی‌های مدل دینامیکی منطقه‌ای PRECIS، استفاده متفاوت از مکانیزم برزیدن و ایجاد آشفستگی برای دو نوع داده ورودی مدنظر قرار گرفت. در ورودی نوع اول برای اثبات امکان جایگزینی مدل K-NN WG، داده‌های مشاهداتی ایستگاه مهرآباد به عنوان ورودی مدل با اجرای هر دو مکانیزم ایجاد آشفستگی و برزیدن معرفی شدند. در ورودی نوع دوم به منظور مشاهده پیش‌بینی مدل دینامیکی منطقه‌ای PRECIS و مقایسه آن با خروجی نوع اول، از داده‌های ریزمقیاس شده زمانی مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 (از سناریوهای گزارش مرحله چهارم IPCC) با اجرای مکانیزم برزیدن به تنهایی استفاده شد. لازم به ذکر است که سناریو B2 بر راه‌حل‌های محلی برای رفاه اقتصادی، اجتماعی و محیطی اشاره داشته و بر این نکته تأکید دارد که تغییرات گوناگون تکنولوژی به سمت حفاظت از محیط‌زیست و حقوق اجتماع در سطح منطقه‌ای پیش می‌رود. در حالی که سناریوی A2 رشد سریع جمعیت، اقتصاد ناهمگون و همسو با شرایط منطقه‌ای را شرایط غالب بر دنیای آینده می‌داند. همان‌طور که ذکر شد، برای ورودی نوع اول از داده‌های مشاهداتی ایستگاه مهرآباد تهران به عنوان ورودی مدل K-NN WG برای شبیه‌سازی رویدادهای بارش مشابه با آنچه که در گذشته مشاهده شده است، استفاده می‌شود. برای ورودی نوع دوم نیز در مرحله اول با استفاده از روشی که توسط Habibnejad and Shokoohi (2020) توسعه داده شده است داده‌های بارش کوتاه‌مدت برای آینده از مدل PRECIS بدست آمدند و سپس در مرحله دوم با استفاده از مدل WG داده‌های حدی لازم برای آینده تولید شدند. در تولید داده برای ورودی نوع دوم به مدل WG از دو فاکتور ریزمقیاس‌نمایی زمانی (جدول ۲) و تغییر زمان (TCF: Time Change Factor) استفاده شده است. این ضریب فاکتور تغییر زمانی برای زمان تداوم‌های مختلف معادل $1/18$ محاسبه شده است (Habibnejad and Shokoohi, 2020). این فاکتور سبب انتقال داده‌های مشاهداتی به دوره زمانی مورد نظر و قبل از ورود به مدل WG خواهد شد. اکنون می‌توان با داشتن داده‌های مشاهداتی و همچنین داده‌های ریزمقیاس شده زمانی در ورودی نوع دوم در افق مطالعه، عملیات برزیدن و ایجاد تلاطم در نوع اول داده‌ها و فقط عملیات برزیدن در نوع دوم داده‌ها را در مدل WG انجام داد و سری زمانی مصنوعی طولانی مدت بارش از ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت را برای ساخت منحنی‌های IDF پیش‌بینی تولید نمود.

مزبور دارای دو گونه پارامتری و ناپارامتری است (Sharif and Burn, 2006). فرض مهم در مدل پارامتری در نظر گرفتن یک تابع توزیع احتمالاتی برای متغیر اقلیمی است. در حالی که در مدل ناپارامتری WG فرضی برای تابع توزیع وجود ندارد و مدل از الگوریتم‌های نمونه‌برداری استفاده می‌نماید. دیگر محدودیت مدل پارامتری وجود خواصی در سری زمانی است که تولید طولانی مدت داده را توجیه نماید. در مدل ناپارامتری این مشکل چون در واقع متکی بر روش‌های نمونه‌برداری تصادفی از داده‌های موجود و در عین حال برزیدن داده‌ها است، وجود ندارد (Peck et al., 2012). لذا در پژوهش حاضر از مدل ناپارامتری Weather Generator 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. ویژگی‌های الگوریتم K-Nearest Neighbor که در مدل K-NN WG استفاده می‌شود عبارتند از: (۱) قادر به مدل‌سازی غیرخطی پویای فرایندهای ژئوفیزیکی است؛ (۲) نیازی به شناسایی توزیع احتمالاتی داده‌ها ندارد و (۳) همبستگی زمانی و مکانی داده‌های تولید شده را حفظ می‌کند. شبیه‌سازی داده‌های تصادفی در الگوریتم K-NN با جمع‌آوری داده‌های مشاهداتی برای ایستگاه مورد نظر آغاز می‌شود. برای تولید یک داده هواشناسی جدید (در این تحقیق بارش)، 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 یکم فروردین ماه تا چهاردهم در همه سال‌هایی که داده موجود است به‌جز مقدار داده مربوط به هفتم 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 می‌شود. 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 متغیر در روز مورد نظر انتخاب می‌شود. سپس مدل با استفاده از دو مکانیزم برزیدن و ایجاد آشفستگی در داده‌های مصنوعی، شبیه داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده را در داخل و خارج از مرزهای داده‌های تاریخی تولید می‌کند. کارایی و توانمندی مدل K-NN WG پیشتر ارزیابی شده است (Habibnejad and Shokoohi, 2020).

۲-۵- آنالیز شدت، مدت و فراوانی

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).

۲-۶- مقایسه شدت مدت فراوانی تحت تأثیر تغییر اقلیم

منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بدست آمده توسط مدل K-NN WG با خروجی مدل PRECIS مقایسه شدند. تفاوت نسبی بین منحنی‌ها با استفاده از رابطه زیر تعیین شده است که در آن x_1 داده مربوط به ورودی نوع اول و x_2 داده مربوط به ورودی نوع دوم می‌باشد:

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

۳- نتایج

در این بخش، به بررسی اختلاف داده‌های شدت بارش تولید شده توسط مدل ناپارامتری K-NN WG و مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 ایستگاه مهرآباد تهران 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 ۲ آورده شده است (Habibnejad and Shokoohi, 2020):

آنالیز شدت-مدت-فراوانی برای بررسی ویژگی‌های اصلی بارش منطقه‌ای برای بارش‌های کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آنالیز ابزار بسیار مؤثری برای تحلیل منطقه‌ای بارش است که با استفاده از داده‌های سری زمانی بارش کوتاه‌مدت در تداوم‌های مختلف صورت می‌پذیرد. پس از جمع‌آوری و تولید داده‌های سری زمانی بارش، حداکثر بارش حدی سالانه در هر تداوم بارش استخراج می‌شود. سپس با استفاده از برازش یک تابع توزیع احتمالاتی مناسب، منحنی شدت-مدت-فراوانی رسم می‌شود. مراحل ذکر شده برای داده‌های بارش کوتاه‌مدت پایه و داده‌های ریزمقیاس شده زمانی مدل PRECIS در دوره پیش‌بینی تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 تکرار شدند. با توجه به داده‌های ثبت شده در ایستگاه هواشناسی مهرآباد در طول دوره تاریخی ۱۹۹۹-۱۹۵۹ که پایه استخراج منحنی‌های IDF موجود در سازمان هواشناسی کشور است و با استفاده از نرم‌افزار Easy Fit، توابع توزیع احتمالاتی حداکثر شدت‌های بارندگی برای تداوم‌های مختلف (۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت) برازش داده شد و آزمون نیکویی برازش بر روی آنها انجام شد (جدول ۱). سه آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، اندرسون-دارلینگ و کای-اسکوئر بدین منظور مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش، توزیع GEV به عنوان بهترین توزیع احتمالاتی برای ایستگاه مهرآباد شهر تهران بر اساس نتایج دو آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ انتخاب شد. توزیع

Table 1- Ranking goodness of fit for different pdfs for the 10-minute rainfall

جدول ۱- رتبه‌بندی آزمون‌های نیکویی برازش مختلف برای داده‌های بارش ۱۰ دقیقه

Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
	Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
Gen. Extreme Value	0.12053	1	1.9392	1	23.224	1
Pearson 5	0.12702	3	3.7229	3	30.866	2
Pearson 5 (3P)	0.12702	2	3.7229	2	30.866	3
Lognormal	0.14864	5	4.8356	5	31.903	4
Lognormal (3P)	0.14863	4	4.8355	4	31.903	5
Gamma	0.21123	6	8.8509	6	36.475	6
Gamma (3P)	0.25842	8	11.915	7	49.497	7
Normal	0.28164	9	18.868	9	121.23	8
Gumbel Max	0.23977	7	13.444	8	161.57	9
Gumbel Min	0.35136	10	39.703	10	N/A	

Table 2- Factors for converting simulated daily rainfall by PRECIS to short-duration rainfall

جدول ۲- ضرایب تبدیل بارش روزانه مدل PRECIS به تداوم‌های کوتاه‌مدت

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

۳-۱- شبیه‌سازی داده‌های روزانه

(شکل ۲). همچنین، روند صعودی منحنی احتمال تجمعی تجربی آنها (بدون در نظر گرفتن توزیع مشخص) مشابه هم می‌باشد (شکل ۳). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مشابهت بین دو مجموعه با طولانی‌تر شدن زمان تداوم بارش بیشتر می‌شود. همچنین، برای بررسی معنی‌داری اختلاف میانگین و واریانس داده‌های شبیه‌سازی شده از آزمون‌های t (برای میانگین‌ها) و F (برای واریانس‌ها) در سطح مخاطره ۵ درصد استفاده شده است. مقادیر بدست آمده برای آماره‌های این آزمون‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. یافته‌های تحقیق نشان داد که مدل ناپارامتری K-NN WG به کار گرفته شده در شبیه‌سازی بارش‌های کوتاه‌مدت مناسب عمل می‌نماید و تمام میانگین‌های شبیه‌سازی شده در مقیاس‌های ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت اختلاف معنی‌داری باهم ندارند. در واقع با توجه به جدول ۳ مقادیر P-value محاسبه شده برای میانگین‌های بارش‌های کوتاه‌مدت بزرگتر از ۰/۰۵ است که به معنای پذیرش فرض صفر مبنی بر یکسان بودن میانگین‌های مورد بررسی می‌باشد. همچنین، در شبیه‌سازی واریانس‌های کوتاه‌مدت نیز نتایج قابل قبولی به دست آمد. به منظور حذف اثر توزیع احتمالاتی بارش‌های کوتاه‌مدت بر ارزیابی همسانی نتایج شبیه‌سازی مدل K-NN WG و برون‌داد مدل PRECIS به مقایسه اختلاف میانه‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری من-وینتی اقدام شد. نتایج این آزمون در جدول ۴ به خوبی موید یکسان بودن میانه‌های متغیرهای مورد بررسی در سطح مخاطره ۵٪ می‌باشد.

به منظور بررسی کارایی و توانمندی مدل K-NN WG در شبیه‌سازی داده‌های بارش کوتاه‌مدت و استفاده از خروجی آن بجای برون‌داد مدل منطقه‌ای PRECIS، کیفیت داده‌های خروجی با استفاده از آماره‌های دو جامعه مورد ارزیابی قرار گرفت. ورودی نوع اول به مدل K-NN WG شامل داده‌های بارش مشاهداتی ایستگاه مهرآباد کلانشهر تهران می‌باشد که با توجه به ایجاد تغییر با اعمال مکانیزم‌های بر زدن و آشفستگی منجر به تولید داده‌های Base Modified شد. ورودی نوع دوم به مدل مزبور داده‌های بارش ریزمقیاس‌نمایی شده مکانی و زمانی مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 می‌باشد که با توجه به نمونه‌گیری به روش برزیدن برای ازدیاد حجم جامعه مورد مطالعه منجر به تولید داده‌های A2 Modified و B2 Modified شد. نتایج این آزمون برای سه دوره زمانی ۱۰ دقیقه، ۱ و ۳ ساعت در شکل ۲ گزارش شده است. همان‌طور که مشخص است میانگین و میانه همه دوره‌های زمانی در محدوده باند اعتماد میانگین و میانه شبیه‌سازی شده بود. به عنوان مثال با توجه به آنکه برای بارش ۱۰ دقیقه‌ای محدوده باند اطمینان ۰/۲۳-۰/۳، ۹۵٪ بدست آمده است، می‌توان ملاحظه نمود که میانگین خروجی نوع اول (10 min- Base Modified) با ۰/۲۷ میلی‌متر و میانگین خروجی نوع دوم (10 min- B2 Modified & 10 min- A2 Modified) که به ترتیب حدود ۰/۲۸ و ۰/۲۹ میلی‌متر است در محدوده باند اطمینان قرار گرفته‌اند

10min-A2 Modified		10min-B2 Modified		10min-BASE Modified	
Anderson-Darling Normality Test		Anderson-Darling Normality Test		Anderson-Darling Normality Test	
A-Squared	2.27	A-Squared	2.44	A-Squared	2.25
P-Value	<0.005	P-Value	<0.005	P-Value	<0.005
Mean	0.28407	Mean	0.29097	Mean	0.26538
StDev	0.10532	StDev	0.11248	StDev	0.09385
Variance	0.01109	Variance	0.01265	Variance	0.00881
Skewness	0.841042	Skewness	0.74216	Skewness	1.38133
Kurtosis	-0.756328	Kurtosis	-1.07270	Kurtosis	1.29523
N	29	N	29	N	29
Minimum	0.18481	Minimum	0.18481	Minimum	0.18586
1st Quartile	0.19754	1st Quartile	0.19754	1st Quartile	0.19491
Median	0.22433	Median	0.22433	Median	0.21473
3rd Quartile	0.38882	3rd Quartile	0.40106	3rd Quartile	0.31456
Maximum	0.52728	Maximum	0.52728	Maximum	0.54445
95% Confidence Interval for Mean		95% Confidence Interval for Mean		95% Confidence Interval for Mean	
	0.24401 0.32414		0.24819 0.33375		0.22968 0.30108
95% Confidence Interval for Median		95% Confidence Interval for Median		95% Confidence Interval for Median	
	0.21306 0.34915		0.21306 0.38138		0.20267 0.28730
95% Confidence Interval for StDev		95% Confidence Interval for StDev		95% Confidence Interval for StDev	
	0.08358 0.14244		0.08926 0.15212		0.07448 0.12693

1Hr-A2 Modified		1Hr-B2 Modified		1Hr-BASE Modified	
Anderson-Darling Normality Test		Anderson-Darling Normality Test		Anderson-Darling Normality Test	
A-Squared	0.47	A-Squared	0.43	A-Squared	0.46
P-Value	0.220	P-Value	0.274	P-Value	0.232
Mean	2.3466	Mean	2.4799	Mean	2.3579
StDev	0.8793	StDev	0.8149	StDev	0.8071
Variance	0.7731	Variance	0.6640	Variance	0.6515
Skewness	0.23553	Skewness	0.195275	Skewness	0.12029
Kurtosis	-1.13727	Kurtosis	-0.369922	Kurtosis	-1.31951
N	19	N	19	N	19
Minimum	1.1734	Minimum	1.3287	Minimum	1.2000
1st Quartile	1.4053	1st Quartile	1.6577	1st Quartile	1.6000
Median	2.5453	Median	2.6248	Median	2.4000
3rd Quartile	3.0050	3rd Quartile	3.0364	3rd Quartile	3.2000
Maximum	3.9640	Maximum	4.2810	Maximum	3.8000
95% Confidence Interval for Mean		95% Confidence Interval for Mean		95% Confidence Interval for Mean	
	1.9228 2.7704		2.0871 2.8727		1.9689 2.7469
95% Confidence Interval for Median		95% Confidence Interval for Median		95% Confidence Interval for Median	
	1.5643 2.9262		1.7942 2.9589		1.6000 3.0272
95% Confidence Interval for StDev		95% Confidence Interval for StDev		95% Confidence Interval for StDev	
	0.6644 1.3003		0.6157 1.2051		0.6099 1.1936

3Hr-A2 Modified		3Hr-B2 Modified		3Hr-BASE Modified	
Anderson-Darling Normality Test		Anderson-Darling Normality Test		Anderson-Darling Normality Test	
A-Squared	10.35	A-Squared	10.17	A-Squared	10.18
P-Value	<0.005	P-Value	<0.005	P-Value	<0.005
Mean	5.9146	Mean	5.9959	Mean	5.9954
StDev	2.1462	StDev	2.3932	StDev	2.0337
Variance	4.6063	Variance	5.7272	Variance	4.1360
Skewness	1.52425	Skewness	1.32339	Skewness	1.73256
Kurtosis	1.27573	Kurtosis	0.42361	Kurtosis	2.12974
N	109	N	109	N	109
Minimum	3.2694	Minimum	3.4655	Minimum	3.8000
1st Quartile	4.5256	1st Quartile	4.4546	1st Quartile	4.8000
Median	5.2878	Median	5.2564	Median	5.6000
3rd Quartile	5.8025	3rd Quartile	5.8482	3rd Quartile	6.0000
Maximum	12.6783	Maximum	12.5391	Maximum	11.8000
95% Confidence Interval for Mean		95% Confidence Interval for Mean		95% Confidence Interval for Mean	
	5.5072 6.3221		5.5416 6.4503		5.6093 6.3815
95% Confidence Interval for Median		95% Confidence Interval for Median		95% Confidence Interval for Median	
	5.1840 5.4366		4.9872 5.4190		5.2000 5.8000
95% Confidence Interval for StDev		95% Confidence Interval for StDev		95% Confidence Interval for StDev	
	1.8942 2.4762		2.1121 2.7611		1.7949 2.3464

Fig. 2- Statistical evaluation of perturbed observed and simulated data by PRECIS
 شکل ۲- ارزیابی آماری داده‌های مشاهداتی جهش یافته و شبیه‌سازی شده با مدل PRECIS

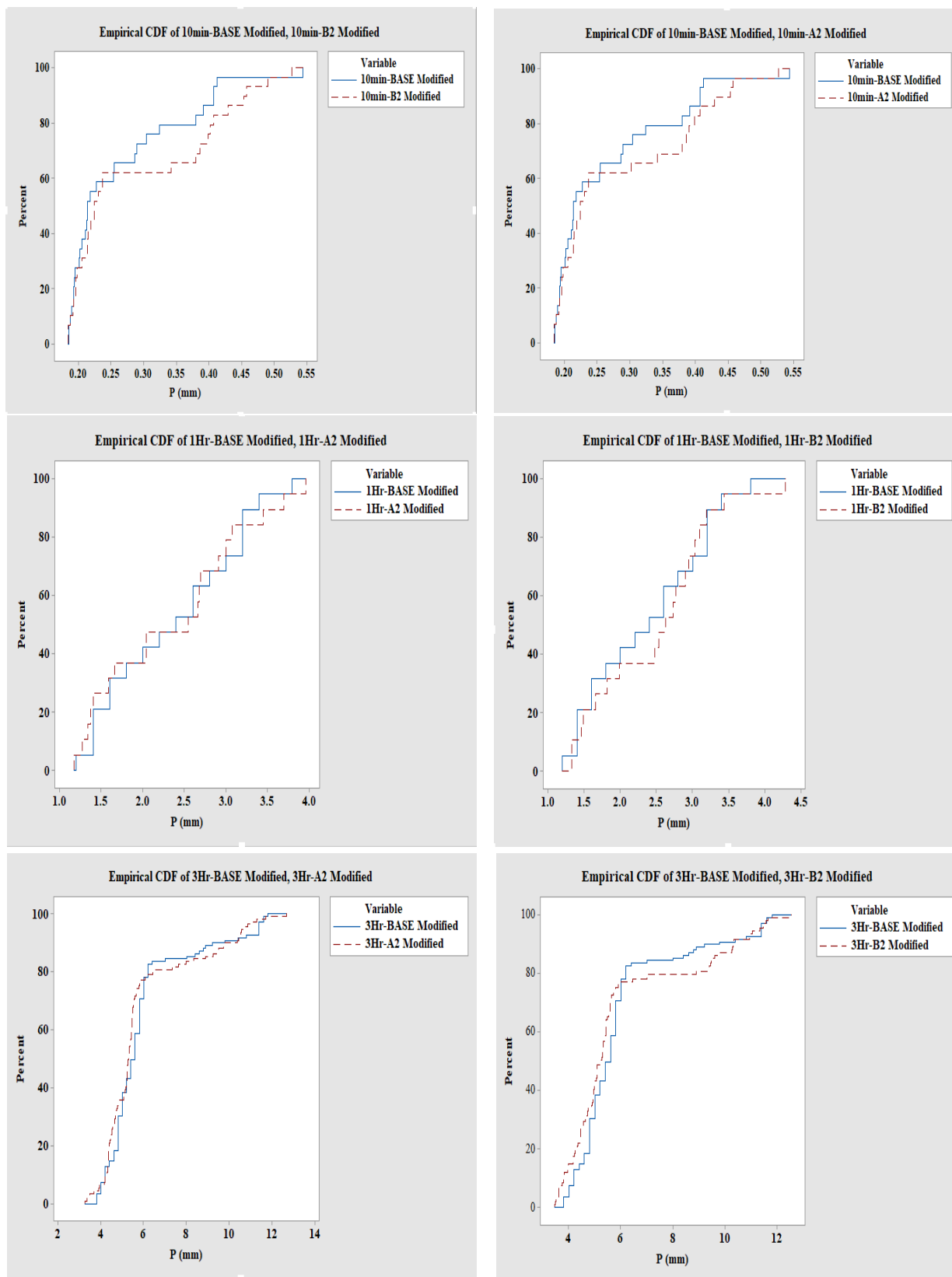


Fig. 3- ECDF of perturbed observed and simulated data by PRECIS
شکل ۳- منحنی احتمال تجمعی تجربی داده‌های مشاهداتی جهش یافته و شبیه‌سازی شده با PRECIS

Table 3- Values of T and F test statistics for K-NN WG model outputs

جدول ۳- مقادیر آماره‌های آزمون T و F برای خروجی‌های مدل K-NN WG

Station	K-NN WG					
	P (mm)	Test statistics	T-Test		F-Test	
			T-value	P-value	F-value	P-value
MehrAbad	p-10 min	Base modified against A2 modified	-0.71	0.478	0.47	0.627
		Base modified against B2 modified	-0.94	0.351		
	p-1 Hr	Base modified against A2 modified	0.04	0.967	0.15	0.862
		Base modified against B2 modified	-0.46	0.646		
	p-3 Hr	Base modified against A2 modified	0.29	0.776	0.05	0.952
		Base modified against B2 modified	-0.00	0.999		

Table 4- Values of Mann-Whitney test statistics for K-NN WG model outputs

جدول ۴- مقادیر آماره‌های آزمون من-ویتنی برای خروجی‌های مدل K-NN WG

Station	K-NN WG			
	P (mm)	Test statistics	Mann-Whitney Test	
			W-value	P-value
MehrAbad	p-10 min	Base modified against A2 modified	808	0.465
		Base modified against B2 modified	800	0.392
	p-1 Hr	Base modified against A2 modified	376	0.884
		Base modified against B2 modified	360	0.770
	p-3 Hr	Base modified against A2 modified	12742	0.083
		Base modified against B2 modified	12579	0.167

۲-۳- بررسی منحنی IDF تحت تأثیر تغییر اقلیم

مدل ناپارامتری K-NN WG با استفاده از مجموعه داده‌های بارش مشاهداتی و داده‌های بارش ریزمقیاس شده مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 اجرا و منحنی IDF برای خروجی‌های مورد نظر ایجاد شد. جدول ۵ نشان‌دهنده مقادیر عمق، مدت و فراوانی داده‌های پایه و مشاهداتی ثبت شده در ایستگاه مهرآباد شهر تهران و اشکال ۴ تا ۷ مربوط به منحنی‌های IDF شامل: شکل (۴) داده‌های بارش ثبت شده ایستگاه مهرآباد مربوط به دوره ۱۹۹۰-۱۹۵۹، شکل (۵) خروجی جهش یافته مدل K-NN WG براساس ورودی بارش مشاهداتی و اعمال مکانیزم‌های بر زدن و ایجاد آشفستگی، شکل‌های (۶ و ۷) خروجی مدل K-NN WG براساس ورودی بارش ریزمقیاس شده مدل PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 و اعمال مکانیزم بر زدن می‌باشد.

۳-۳- مقایسه منحنی IDF بدست آمده توسط مدل PRECIS با مدل K-NN WG

به منظور مقایسه شدت بارش‌های حدی بدست آمده از نمونه‌گیری و اعمال تغییرات در داده‌های ثبت شده در فرودگاه مهرآباد در مدل K-NN WG با نتایج مدل PRECIS در آینده دور تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 (با نام‌های A2 Modified و B2 Modified) از معادله ۱ استفاده به عمل آمد و اختلاف شدت بارش نظیر به نظیر محاسبه و در شکل‌های ۸-a و ۸-b ترسیم شدند که به ترتیب مربوط به مقایسه مقادیر جهش یافته با شدت بارش‌های آتی تحت سناریوی انتشار A2 و B2 می‌باشند. اختلاف داده‌های BASE Modified با A2 Modified و B2 Modified به ترتیب به‌طور میانگین ۴٪ و ۳٪ می‌باشد.

Table 5- Depth of rainfall in base period for different return periods
 جدول ۵- عمق بارش برای دوره بازگشت‌های مختلف براساس داده‌های پایه (مشاهداتی)

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

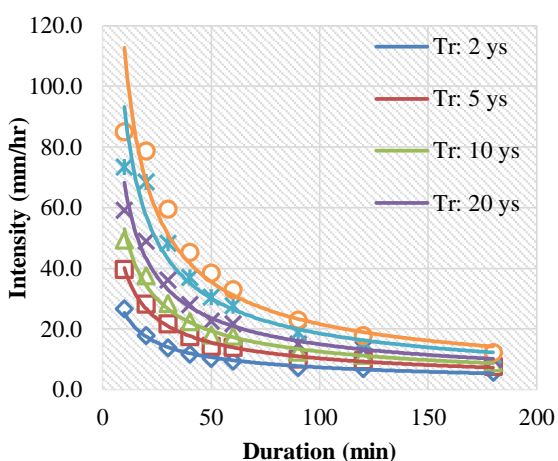


Fig. 5- IDF curves for base modified period
 شکل ۵- منحنی شدت مدت فراوانی جهش یافته براساس داده‌های پایه

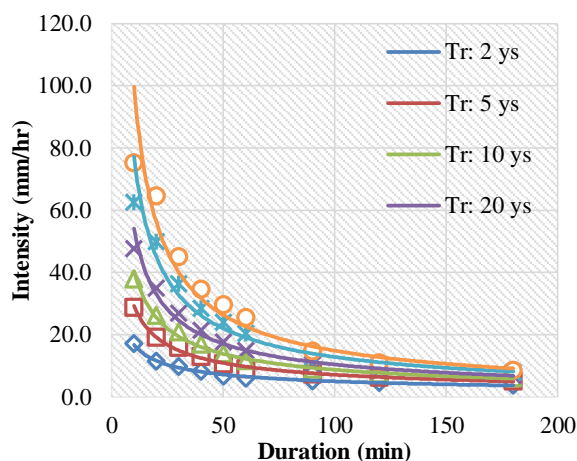


Fig. 4- IDF curves for base period
 شکل ۴- منحنی شدت مدت فراوانی براساس داده‌های پایه

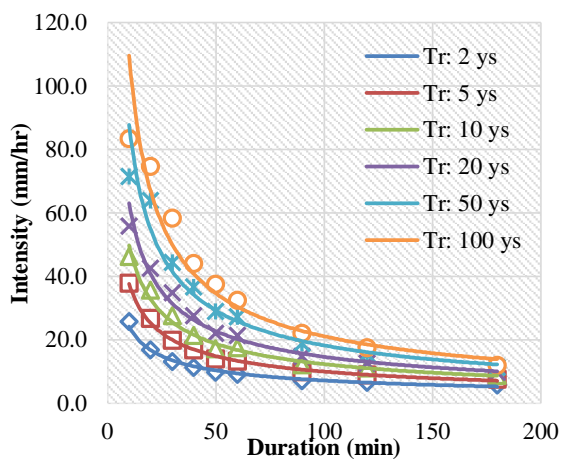


Fig. 7- IDF Curves for A2 modified scenario
 شکل ۷- منحنی شدت مدت فراوانی تحت سناریو A2 modified

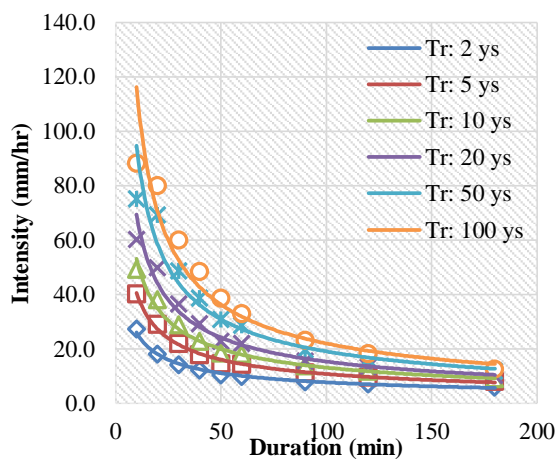


Fig. 6- IDF curves for B2 modified scenario
 شکل ۶- منحنی شدت مدت فراوانی تحت سناریو B2 modified

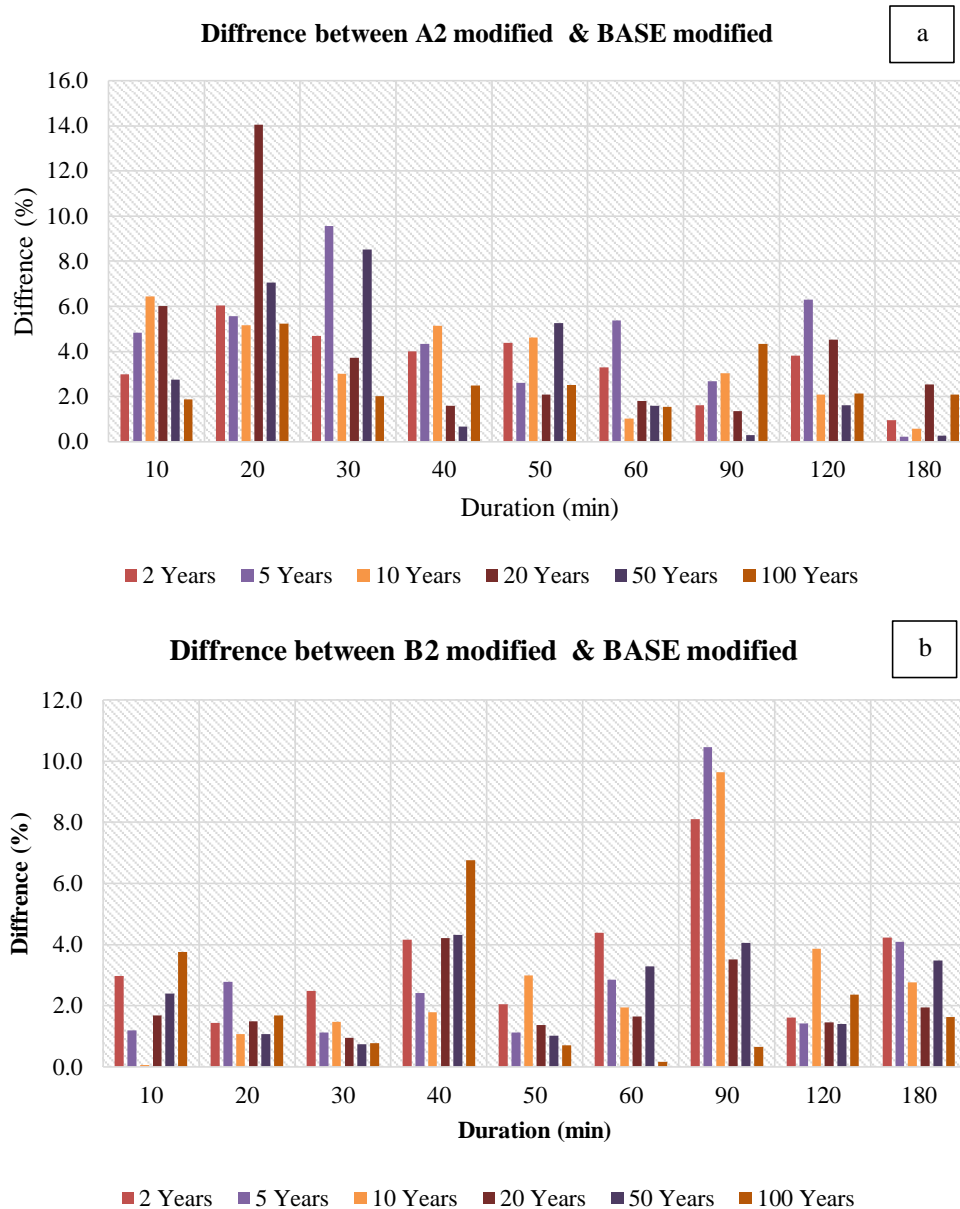


Fig. 8- Difference in the rainfall intensity between: (a) PRECIS Model A2 modified and base modified- (b) PRECIS Model B2 modified and base modified

شکل ۸- اختلاف شدت بارش بین مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریو انتشار A2 modified و پایه جهش یافته (a) - مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریو B2 modified و پایه جهش یافته (b)

نوع دوم) برای دوره بازگشت دو و صد ساله در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود IDF جهش یافته مدل K-NN WG که با استفاده از داده‌های مشاهداتی و دو مکانیزم برزدن و ایجاد آشفستگی داده‌های مورد نیاز را تولید نمود، بسیار مشابه و نزدیک به سناریوهای انتشار A2 Modified و B2 Modified می‌باشد.

برای ارزیابی امکان جایگزینی داده‌های مدل WG بجای مدل IDF بدست آمده با استفاده از چهار نوع داده شامل: (۱) داده‌های مشاهداتی، (۲) داده‌های مشاهداتی جهش یافته با استفاده از مدل WG (نوع اول) و (۳ و ۴) داده‌های ریزمقیاس نمایی زمانی مدل PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 تغییر یافته (ورودی

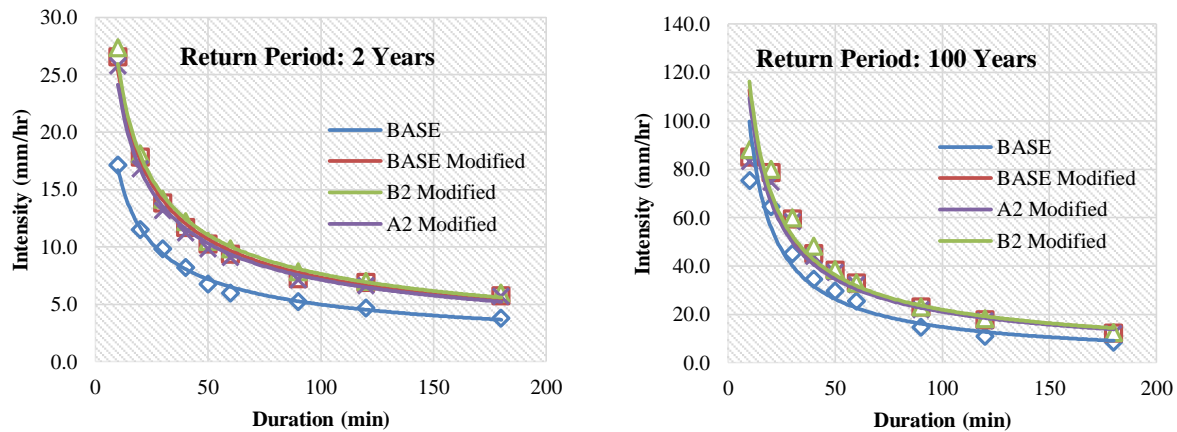


Fig. 9- IDF curves in the base modified period, A2 modified, and B2 modified scenarios for 2 and 100-year time return

شکل ۹- منحنی شدت مدت فراوانی پایه، جهش یافته، سناریوهای تغییر اقلیمی A2 modified و B2 modified در دو دوره بازگشت ۲ و ۱۰۰ سال

در تولید داده با مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریو انتشار A2 و B2 به ترتیب در حدود ۴٪ و ۳٪ نشان‌دهنده دستیابی به هدف پژوهش یعنی امکان جایگزینی خروجی موتور تولید داده برای پیش‌بینی بارش در آینده به جای برون‌داد مدل‌های تغییر اقلیمی باشد.

از عمده مشکلات تحقیق حاضر عدم دسترسی به داده‌های مشاهداتی و همین‌طور نتایج جدید مدل منطقه‌ای PRECIS بود. استفاده از داده‌های جدید و به روز در تحقیقات این امکان را به محققین می‌دهد تا با استفاده از این داده‌های مشاهداتی مطالعات بروزتر و دقیق‌تری داشته باشند. لذا، لازم است داده‌های بارش که در سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری می‌گردد با سهولت بیشتری در اختیار پژوهشگران قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Weather Generator
- 2- Shuffling
- 3- Perturbation
- 4- Mitigation

۴- خلاصه و جمع‌بندی

این پژوهش برای اولین بار و با هدف ارزیابی امکان استفاده از تولیدات داده‌های بارش کوتاه‌مدت موتورهای مولد داده آب و هوایی بجای برون‌داد مدل‌های تغییر اقلیم صورت گرفته است. برای دستیابی به هدف پژوهش از مدل K-NN WG به عنوان موتور مولد داده و مدل تغییر اقلیم منطقه‌ای PRECIS با ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 و روش ریزمقیاس‌نمایی زمانی مبتنی بر داده‌های مشاهداتی به همراه داده‌های بارش مشاهداتی و ثبت شده ایستگاه مهرآباد با تداوم ۱۰ دقیقه تا ۳ ساعت استفاده به عمل آمده است.

مدل K-NN WG مورد استفاده در این پژوهش از دو مکانیزم قدرتمند (۱) برزدن: برای تولید داده‌های مشابه با داده‌های مشاهداتی به منظور ایجاد سری زمانی طولانی و مصنوعی بارش با تداوم‌های مختلف، و (۲) مکانیزم ایجاد آشفستگی برای تولید داده‌هایی خارج از محدوده مشاهداتی برخوردار است. مدل K-NN WG با هر دو مکانیزم برای داده‌های مشاهداتی به منظور تولید داده‌های بارش کوتاه‌مدت در آینده دور و ایجاد منحنی شدت-مدت-فراوانی جهش یافته و تنها با مکانیزم برزدن برای داده‌های برون‌داد مدل منطقه‌ای PRECIS تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 اجرا شد.

نتایج اولاً نشان‌دهنده افزایش شدت بارش‌های کوتاه‌مدت در آینده نسبت به حال است که به خوبی مؤید نتایج به دست آمده توسط دیگر محققین (Fadhel et al., 2017; Aghakouchack et al., 2018) می‌باشد، ثانیاً اختلاف بسیار کم خروجی مدل قدرتمند K-NN WG

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
- Ailliot P, Allard D, Monbet V, Naveau P (2015) Stochastic weather generators: An overview of weather type model. Technical Report
- 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(2015):990-1005
- Babaeian E, Modirian M, Karimian M, Malbusi SH (2010) Capability of PRECIS regional climate model for modeling regional precipitation of Iran. *Physical Geography Research Quarterly* 43(77):125-140
- Bani_Habib M, Hassani KH, Massah Bavani (2015) Evaluation of the effect of climate change on the inflow to the Shahcherakhi Dam reservoir. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources* 30(1):1-4
- Benestad, RE (2004) Empirical-statistical downscaling in climate modeling. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 85(42):417-422
- Binesh N, Niksokhan MH, Sarang A (2017) 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)
- Cheng C S, G Li, Q Li, H Auld, D MacIver (2007) Climate change and extreme rainfall-related flooding and surface runoff risk in Ontario Plain. Language Summary Report, Climate Change Impacts and Adaptations Program Report no. A901. Toronto, Ontario: Environment Canada, 18 pp
- Coulibaly P, Dibike Y B (2004) Downscaling of global climate model outputs for flood frequency analysis in the Saguenay River System. Final Project Report prepared for the Canadian Climate Change Action Fund, Environment Canada, and Hamilton, Ontario, Canada
- Danandeh Mehr A, Kahya E (2016) Grid-based performance evaluation of GCM-RCM combinations for rainfall reproduction. *Theoretical and Applied Climatology* 129(1-2):47-57
- De Paola F, Giugni M, Topa ME, Bucchignani E (2014) Intensity-Duration-Frequency (IDF) rainfall curves, for data series and climate projection in African cities. *Journal of Springer Plus* 3(133):1-18
- 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(2017):600-612
- Fallah Ghalhari Gh, Yousefi H, Hosseinzadeh A, Alimardani MR, Reyhani A (2018) Assessment of climate change in Bojnourd station in 2016-2050 using downscaling models LARS-WG and SDSM. *Journal of ECO Hydrology* 6(1):99-109 (In Persian)
- Ghamghami M, Ghahraman N, Araginejad SH (2011) Application of a nonparametric approach in simulating daily temperature and precipitation data in line with climate change. *Journal of Climatological Research* 1(3-4):75-94 (In Persian)
- 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)
- Habibnejad R, Shokoohi A (2020) Uncertainty analysis of IDF curves simulation under climate change scenarios using a weather generator model (Case Study: Tehran). *Journal of Iran-Water Resources Research* 16(2):164-177 (In Persian)
- Hashmi M Z, Shamseldin A Y, Melville B W (2009) Downscaling of future rainfall extreme events: A weather generator based approach. 18th World IMACS/ MODSIM Congress Cairns, Australia: 13-17
- Heyrari M, khazaei R (2016) Impact of climate change in maxim precipitation (Case study: Kermanshah). *Journal of Soil and Water Resources Conservation* 7(2):27-39 (In Persian)
- IPCC Climate Change (2014) 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)
- 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)
- Kolbert, E (2006) Field notes from a catastrophe: Man, nature, and climate change. Bloomsbury Publishing, New York
- Kordjazi M, Bagherian S, Kamali M (2012) Investigating the effects of climate change on

- extreme rainfall in Golestan. Fifth International Conference on Comprehensive Management of Natural Crisis (In Persian)
- Rahimi Bandar Abadi S, Jahanbakhsh Asl S, Sari Sarraf B (2018) Evaluation of a dynamical downscaling climate model for assessment of climate change in Karkheh Basin. *Journal of Watershed Engineering and Management* 11(3):633-649 (In Persian)
- Mailhot A, Duchesne S (2010) Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(2):201-208
- Mitchell TD (2003) Pattern scaling: An examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change* 60(3):217-242
- Mirhosseini GB, Srivastava P, Stefaanova L (2013) The impact of climate change on rainfall Intensity-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
- Sadeghirad R, Akhondali A, Radmanesh F, Zamani Ahmadi Mahmoudi R (2010) Climate change models and their impact on water resources. First National Conference on Strategies for Achieving Sustainable Agriculture (In Persian)
- Sarr MA, Seidou O, Trambly Y, El Adlouni S (2015) Comparison of downscaling methods for mean and extreme precipitation in Senegal. *Journal Hydrology* 4:369-385
- Safavi HR, Dadjou Sh, Naeimi G (2019) Extraction of Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves under climate change, Case study: Isfahan Synoptic Station. *Journal of Iran-Water Resources Research* 15(2):217-227
- Sharghi E, Nourani V, Jabbarian Panknezhad N (2020) Estimation of prediction interval in ANNBased GCM downscaling. *Journal of Iran-Water Resources Research* 4(15):187-199
- Sharif M, Burn DH (2008) Improved k-nearest neighbor weather generating model. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering* 12(1):42-51
- Sharif M, Burn D H (2006a) Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model. *Journal of Hydrology* 325:179-196
- 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, Yücel I (2015) Inter-comparison of statistical downscaling methods for the projection of extreme precipitation in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences* 19:1827-1847
- 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
- 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
- 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