

Uncertainty of Extreme Rainfall Intensity and Frequency under Future Climate Change Impact: Khorasan-Razavi Province

H. Seyed Kaboli¹

Abstract

Global warming has caused the characteristics of extreme rainfall to be changed out of the internal variability range of climate. In this research an analysis is presented for the variation of rainfall intensity, duration, and frequency (IDF) in Khorasan-Razavi province under 10 climate scenarios derived from the global climate models and A1B emission scenario for 2021-2040 period. The IDF values for 23 rain gages is projected under future climate scenarios in 3 risk levels (%25, %50 and %75) by a proposed combined approach consisted of: (1) developing a nonparametric downscaling model to project the future daily rainfall in arid and semi-arid regions, and (2) establishing frequency-quantile relationships between the t -hour and daily rainfall based on the annual maximum for estimating the IDF values. Under the risk level of %50 the results show a wide range of variation in rainfall intensity between -23% to +7.3% relative to baseline (1993-2012). Short duration rainfalls change in more positive range than long-durations and for return periods of more than 10-year the range of changes will be wider in this area. Generally, central and southern regions will be received slighter increase compared to the northern regions. Also, the high rainfall regions will face a more severe flooding while the low rainfall regions will suffer from a more severe decrease. Furthermore, in low risk level the rainfall intensity will be increased in the future period which can be alerting for design of hydraulic infrastructures of high importance.

Keywords: Extreme rainfall, Climate change, Khorasan-Razavi, Downscaling, Uncertainty

Received: April 5, 2016

Accepted: June 18, 2016

عدم قطعیت مقادیر شدت-فراوانی بارش‌های حداکثر در اثر تغییر اقلیم آبی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)

حسام سید کابلی^۱

چکیده

گرمایش جهانی خصوصیات بارش‌های حدی را دستخوش تغییراتی خارج از دامنه تغییرات درونی اقلیم کرده است. در این تحقیق تحلیلی از نحوه تغییر مقادیر شدت-مدت-فراوانی بارش (IDF) تحت ۱۰ سناریوی اقلیمی مشتق شده از مدل‌های اقلیم جهانی و سناریوی انتشار A1B برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ در استان خراسان رضوی ارائه شده است. مقادیر IDF برای ۲۳ ایستگاه مورد بررسی تحت سناریوهای اقلیمی آینده در ۳ سطح ریسک (%۲۵، %۵۰ و %۷۵) توسط یک روش ترکیبی پیشنهادی شامل: (۱) تصویر سازی سناریوی بارش روزانه آبی توسط یک مدل ریزمقیاس‌سازی ناپارامتریک توسعه داده شده برای مناطق خشک و نیمه خشک، (۲) استخراج مقادیر IDF براساس روابط چندک-فراوانی بارش بین بارش‌های ساعتی و روزانه در ترم سری‌های حداکثر سالانه، برآورد شده‌اند. نتایج نشان داد که شدت بارش‌ها در سطح ریسک %۵۰ نسبت به دوره پایه ۲۰۱۲-۱۹۹۳ بین ۲۳- تا ۷/۳٪ تغییر خواهد کرد. در این بین تداوم‌های کمتر نسبت به بیشتر دامنه تغییرات مثبت‌تری داشته و در دوره‌های بازگشت بالاتر دامنه تغییرات وسیع‌تر خواهد بود. بطور کلی مناطق مرکزی و جنوبی افزایش کمتری را نسبت به نواحی شمالی استان شاهد خواهند بود. همچنین مناطق پرباران شدت سیل خیزی بیشتری را پیش‌رو خواهند داشت و در مقابل مناطق کم باران کاهش شدیدتری را متحمل می‌شوند. در سطوح ریسک کم نیز مقادیر شدت‌های حداکثر در آینده افزایش خواهد یافت که این موضوع می‌تواند در طراحی سازه‌های پراهمیت مورد توجه خاص قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بارش حدی، تغییر اقلیم، خراسان رضوی، ریزمقیاس‌نمایی، عدم قطعیت

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۹/۲۶

¹-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jundi Shapur University of Technology, Dezful, Iran. Email: hkaboli@jsu.ac.ir

*- Corresponding Author

^۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور

*- نویسنده مسئول

۱- مقدمه

تغییرات ۱۰/۷ تا ۳۴/۹ درصدی در مقادیر منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی بارش (Intensity-Duration-Frequency, IDF) برای شهر لندن (کانادا) در دوره ۲۰۵۰ می‌باشد. همچنین Solaiman and Simonovic (2011a) براساس مطالعات انجام شده در حوضه بالادستی رودخانه تیمز اذعان کردند که احتمال زیادی وجود دارد که رخدادهای بارش حداکثر با فراوانی بیشتر در آینده رخ دهد. بنابراین درک صحیح از تغییرات بارش‌های سیل آسا در آینده -به دلیل اثر تغییر اقلیم- که تأثیر بسزایی در مدیریت منابع آب سطحی دارد، ضروری به نظر می‌رسد.

اکثر مطالعات تأثیر تغییر اقلیم آبی بر بارش‌های حداکثر -تداوم‌های کمتر از ۲۴ ساعت- با محدودیت‌های زیادی مواجه هستند. Solaiman and Simonovic (2011b) با برشمردن این محدودیت‌ها شامل: استفاده از یک مدل اقلیمی که به تنهایی نمی‌تواند معرف خوبی برای اقلیم آینده باشد، تفاوت دقت روش‌های ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی، کاربرد نسبت مقیاس بارش ساعتی به بارش روزانه و فرض یکسان بودن شکل توزیع‌های آماری در دوره مشاهداتی و آینده، مطالعه‌ای را برای تعیین مقادیر IDF در شرایط تغییر اقلیم آبی (دوره ۲۰۵۰) با فائق آمدن بر این محدودیت‌ها انجام دادند. آنها با استفاده از ۲۹ سناریو تغییر اقلیم بدست آمده از مدل‌های اقلیمی و یک روش ریزمقیاس‌سازی بر مبنای الگوریتم نزدیکترین همسایگی (K-NN)، داده‌های ساعتی را در اقلیم آینده با استفاده از داده‌های بارش روزانه و ساعتی مشاهداتی، خارج از دامنه داده‌های ورودی برآورد کردند. نتایج تغییراتی حدود ۲۰ تا ۴۰ درصدی را در بارش‌ها با تداوم‌های مختلف نشان می‌دهند. با این وجود هنوز محدودیت‌هایی مانند: عدم کفایت داده‌های ساعتی در یک منطقه و بررسی تفاوت تأثیر سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای همچنان باقی است. این پژوهش سعی دارد با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های ذکر شده، تأثیر تغییر اقلیم را بر روی بارش‌های حداکثری با تداوم‌های مختلف در یک دوره آبی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ را برای استان خراسان رضوی بررسی کند.

۲- مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان خراسان رضوی دارای وسعتی بیش از ۱۲۷ هزار کیلومترمربع می‌باشد که بین مدار جغرافیایی ۵۲' ۳۳° تا ۳۷' ۴۲° عرض شمالی و ۱۹' ۵۶° تا ۱۶' ۶۱° طول شرقی قرار گرفته است (شکل-۱). در این مطالعه از داده‌های بارش روزانه و رگبار ثبت شده در ۲۳ ایستگاه

تغییر اقلیم جهانی ناشی از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای بدلیل فعالیت‌های بشری اثر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع زمانی-مکانی آب در دنیا داشته است. از طرفی تغییر اقلیم نه تنها بر میانگین آب قابل دسترس تأثیر گذاشته بلکه تغییراتی را در خصوصیات بارش‌های حداکثر هم ایجاد می‌کند (Simonovic and Li, 2005). براساس گزارشات هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) فراوانی بارش‌های حدی در بسیاری از مناطق در اواخر قرن بیستم بدلیل گرمایش جهانی افزایش پیدا کرده است و تداوم این روند در قرن ۲۱ نیز محتمل می‌باشد. بنابراین این موضوع می‌تواند مشکلاتی را در تأمین آب قابل دسترس برای رفع نیاز حیاتی بشر بوجود آورده و بر توانایی منطقه‌ای در مواجهه با بلایای طبیعی مرتبط با آب تأثیر بسزایی بگذارد.

پژوهش انجام شده بر روی بارش‌های حداکثر با تداوم‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ساعته در دو ایستگاه هواشناسی در تاسکانی، ایتالیا نشان می‌دهد که بارش‌های کوتاه‌مدت روند افزایشی دارند درحالیکه بارش‌های بلندمدت دارای روند خاصی نمی‌باشند (Pagliara et al., 1998). Adamowski and Bougadis (2003) حداکثر شدت‌های بارش سالانه را برای تداوم‌های بین ۵ دقیقه تا ۱۲ ساعت بدست آمده از ۴۴ ایستگاه در استان آنتاریو کانادا را مورد بررسی قرار دادند. آنها هر دو روند مثبت و منفی را در برخی مناطق بخصوص برای تداوم‌های کم مشاهده کردند. Arnbjerg-Nielsen (2006) تحلیل روند خصوصیات بارش‌های حداکثر را با استفاده از داده‌های ۴۱ ایستگاه و روش‌های تحلیل منطقه در دانمارک انجام دادند. نتایج، افزایشی را در شدت و فراوانی رخدادهای حداکثر بارش نشان می‌دهد. در مطالعه دیگر در دانمارک، Madsen et al. (2009) برآورد کردند که شدت‌های بارش در دوره‌ی ۲۰۰۵-۱۹۷۹ نسبت به دوره‌ی ۱۹۹۶-۱۹۷۹ با توجه به دوره بازگشتشان بین ۵ تا ۲۰ درصد تغییر می‌کند.

بررسی تأثیر تغییر اقلیم آبی بر بارش‌های حداکثر برای استان کبک واقع در کانادا نشان می‌دهد که دوره بازگشت رخدادهای ۲ و ۶ ساعته بطور تقریبی در اقلیم آینده (۲۰۷۰-۲۰۴۱) نصف خواهند شد در حالی که برای رخدادهای ۱۲ و ۲۴ ساعته به یک سوم کاهش پیدا خواهند کرد (Mailhot et al., 2007). در دانمارک نیز Onof and Arnbjerg-Nielsen (2009) پیش بینی کردند که بارش‌های حداکثر، حدود ۲ تا ۱۵ درصد در ۸۰ سال آینده افزایش پیدا می‌کند. نتایج تحقیقات Simonovic and Peck (2009) حاکی از دامنه

بارانسنجی وابسته به وزارت نیرو بین سال‌های ۱۳۵۴ تا ۱۳۹۲ شمسی استفاده شده است.

بارندگی در استان از اواخر پاییز شروع و به اوایل بهار ختم می‌گردد. بیشترین بارندگی‌ها به اواخر زمستان و اوایل بهار مربوط می‌باشد و در واقع خیلی از مناطق نیز در اکثر سال‌ها پاییز خشکی را تجربه می‌کنند. همچنین میزان بارش‌ها در تابستان بسیار کم است به طوری که در نواحی جنوبی استان تقریباً صفر می‌باشد. همچنین حداکثر شدت بارش روزانه با دوره بازگشت ۲ ساله در استان بین ۰/۵ تا ۱/۱ و با دوره بازگشت ۵۰ ساله بین ۱/۲ تا ۲/۱ میلی‌متر در ساعت تغییر می‌کند. این تغییرات کم نشان می‌دهد که تقریباً شدت‌های بارش روزانه در کل استان به یک شکل می‌باشد. با این حال با کم شدن مدت بارش دامنه تغییرات بارش در استان بیشتر می‌شود. بطوریکه در تداوم ۳۰ دقیقه این دامنه برای دوره بازگشت ۲ ساله بین ۷ تا ۱۳/۹ و برای دوره بازگشت ۵۰ ساله بین ۱۹/۳ تا ۴۴/۶ میلی‌متر در ساعت می‌باشد. بیشترین مقادیر مربوط به مناطق شمالی غربی و مناطق کوهستانی استان بوده و کمترین آنها مربوط به نواحی شرقی و جنوبی استان می‌باشد.

استان خراسان رضوی از نظر اقلیمی خشک و نیمه خشک سرد می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه استان طی دوره آماری (۱۳۹۲-۱۳۷۲) حدود ۲۳۲ میلی‌متر است، درحالی‌که متوسط دارزمدت بارندگی در ایران و جهان به ترتیب ۲۴۳ و ۷۸۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. بنابراین متوسط بارندگی استان حدود یک چهارم متوسط بارش جهانی است که این نشان می‌دهد این منطقه جزء مناطق بسیار کم باران جهان به‌شمار می‌آید. از طرفی قسمت عمده بارندگی‌های سالیانه را بارش‌های سیل‌آسا، کوتاه مدت و رگباری تشکیل می‌دهند. توزیع بارش‌ها در استان یکنواخت نبوده و بطور کلی مقدار آن از شمال به جنوب استان کاهش می‌یابد (شکل-۲). دامنه تغییرات بارش سالانه در گستره استان بین ۱۲۰/۴ تا ۳۷۵/۳ میلی‌متر می‌باشد.

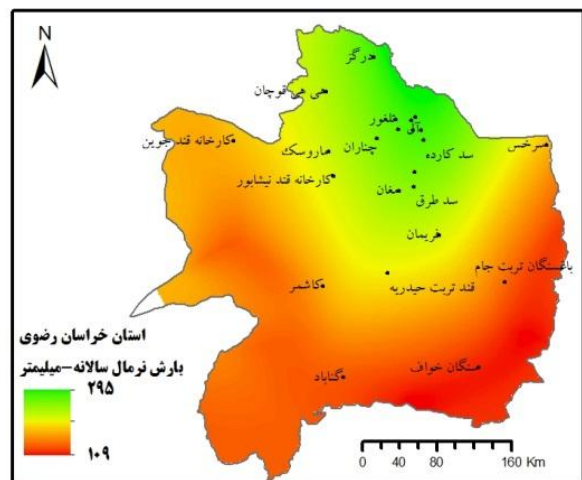
سناریوهای تغییر اقلیمی بارش

مقادیر بارش روزانه برای دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) با ریزمقیاس کردن ۱۰ سناریوهای تغییر اقلیم به‌دست آمده از ۱۰ مدل گردش عمومی (GCM) شامل: HadCm3, CSIRO-MK3.5, GFDL-ER, CM2.1, MIROC3.2MEDRES, CGCM3.1(T63), GISS-ECHAM5OM, CNRMCM3, MRICGM2.3.2a, INMCM3 تحت سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A1B تصویرسازی می‌شوند. مدل‌های GCM معادلات جرم، مومنتم و ترمودینامیک را برای ایجاد توصیفی از وضعیت اتمسفر حل کرده و بسیاری از پارامترهای هواشناسی را تولید می‌کنند (Helfer et al., 2012). با این وجود این مدل‌ها بدلیل نقصان اطلاع از درک فرایند اتمسفر-اقیانوس که منجر به عدم توانایی مدل‌سازی با مقیاس محلی می‌شود، دارای تفکیک مکانی - بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتر- و زمانی - اغلب ماهانه- بزرگ هستند؛ درحالی‌که این مقیاس‌ها قابل کاربرد برای مدل‌های بررسی کننده اثر تغییر اقلیم مانند تحلیل فراوانی بارش نمی‌باشند.

مولدهای تصادفی آب و هوایی یکی از پرکاربردترین روش‌های آماری برای ریزمقیاس‌سازی خروجی مدل‌های GCM می‌باشند. یکی از این مولدهای تصادفی آب و هوا، مدلی است که توسط Sharif and Burn (2006) با استفاده از روش ناپارامتریک نزدیکترین همسایگی (K-Nearest Neighbor, K-NN) توسعه داده شد. Seyed Kaboli et al. (2012), Sharif and Burn



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان خراسان رضوی



شکل ۲- توزیع بارش نرمال سالانه

(2006) و Goyal et al. (2013) نشان دادند که روش K-NN مقادیر میانگین داده‌های بازتولید شده را به خوبی حفظ می‌کند. بنابراین میانگین تغییر اقلیم براساس هریک از سناریوهای موجود بخوبی شبیه‌سازی می‌شوند. مولدهای آب و هوایی در واقع از یک پایگاه داده که معرف اقلیم منطقه بوده، به صورت تصادفی داده تولید می‌کنند. Solaiman and Simonovic (2011b) پایگاه داده‌ای را براساس سناریوهای خروجی بدست آمده از مدل‌های GCM به این مولد تعریف کردند. آنها با استفاده از روش دلتا (Helfer et al., 2012) سناریوهای تغییر اقلیم بارش را برای دوره آتی نسبت به دوره پایه و براساس خروجی هر یک از مدل‌های GCM بصورت ماهانه بدست آوردند. در روش دلتا سناریوهای تغییر اقلیم بارش براساس نسبت بین مقادیر میانگین ماهانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه، محاسبه می‌شوند (رابطه ۱).

$$\Delta f(i) = \frac{V_{m,f}(i)}{V_{m,b}(i)}; \quad i = 1, 2, \dots, 12 \quad (1)$$

در این رابطه m ، f و b به ترتیب بیانگر مدل GCM، دوره آتی و دوره پایه (۲۰۱۲-۱۹۹۳) می‌باشند. همچنین $\bar{V}(i)$ مقادیر میانگین ماهانه در یک دوره آماری را نشان می‌دهد. سپس با فرض یکنواختی توزیع عامل تغییر در روزهای هر ماه، پایگاه داده مربوط به هر سناریو را با اعمال فاکتور تغییر اقلیم بر داده‌های روزانه مشاهداتی ایجاد کردند (رابطه ۲):

$$V_{d,f}(i, j) = V_{o,b}(i, j) \Delta f(i); \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, 12; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$V_{d,f}(i, j)$ مقادیر پایگاه داده روزانه براساس سناریوی تغییر اقلیم دوره آتی (f) نسبت به دوره پایه (b) که برای هر مدل GCM بدست می‌آید. $V_{o,b}(i, j)$ مقادیر روزانه مشاهداتی در دوره پایه بوده و همچنین j بیانگر تعداد روزهای موجود در ماه i ام می‌باشد. در رابطه (۲) فرض شده که پراکنندگی داده‌ها تغییر نمی‌کند و تنها داده‌ها به یک نسبت و یا مقدار ثابتی تغییر می‌کنند. این موضوع باعث شباهت توزیع داده‌ها در سناریوهای مختلف نسبت به هم می‌شود، که فرایند اغتشاش اضافه شده به الگوریتم پایه‌ای K-NN این مورد را نیز مرتفع کرده است. در الگوریتم پایه‌ای K-NN داده روز منتخب از نزدیکترین همسایگان فاصله‌ای خود با در نظر گرفتن یک توزیع احتمال ناپارامتریک، به صورت تصادفی باز تولید می‌شوند. بنابراین تعیین فضای همسایگی مناسب به معنای برآورد صحیح فضای احتمال انتخاب می‌باشد. (Sharif and Burn (2006) و Goyal et al. (2013) بدون در نظر گرفتن اینکه روز منتخب بارانی است یا نه، فضای همسایگان ممکن این روز را تعیین کردند. در حالی که در یک

اقلیم خشک روزهای بدون بارش بسیار زیاد بوده و همچنین توزیع داده‌های بارش روزانه دارای چولگی زیاد می‌باشند. بنابراین ممکن است بسیاری از همسایگان یک روز بارانی منتخب بدون بارش داشته و نزدیکترین همسایگان یک روز منتخب بدون بارش نیز حتماً بدون بارش خواهند بود. این موضوع بازتولید داده‌های بارشی حداکثر را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد چراکه بارش‌ها با مقدار کم در این نواحی دارای احتمال وقوع بیشتری هستند. لذا فضای همسایگان با توجه به روز منتخب باید طوری اصلاح شوند تا حجم محاسبات کاهش یافته و دقت برآوردها بیشتر شود. در روش پیشنهادی بارانی بودن و نبودن روز منتخب مبنای تعیین فضای همسایگان خواهد بود. به طوری که اگر روز منتخب بارانی باشد فضای همسایگان به روزهای بارانی محدود شده و اگر بدون بارش باشد فضای احتمال انتخاب صفر خواهد بود. با این وجود الگوریتم پایه‌ای K-NN تنها قادر به باز تولید داده‌های مشابه با داده‌های مشاهداتی خواهد بود. Sharif and Burn (2006) و Goyal et al. (2013) با اضافه کردن فرایند اغتشاش براساس توزیع نرمال و گاما به داده‌های بازتولید شده از تولید داده‌های مشابه نیز جلوگیری کردند. در این مطالعه نیز از توزیع نرمال به عنوان فرایند اغتشاش استفاده شده است:

$$y_{i,t+1} = x_{i,t+1} + \quad (3)$$

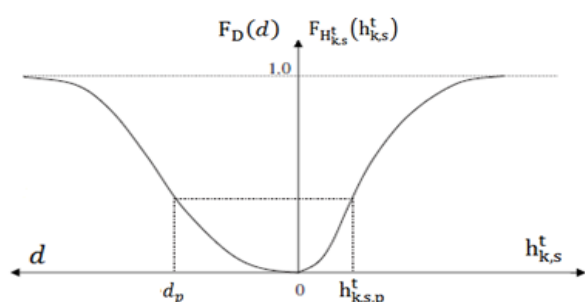
$\lambda \sigma_i z_{t+1}$
که در آن $x_{i,t+1}$ مقدار پارامتر هواشناسی بدست آمده برای روز $t+1$ از الگوریتم پایه‌ای K-NN، $y_{i,t+1}$ مقدار همان پارامتر بعد از فرایند اغتشاش، z_{t+1} متغیر تصادفی تولیدی برای روز $t+1$ از توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس واحد، σ_i انحراف معیار مشروط از همسایگان و λ پهنای باند می‌باشند. در طی این فرایند ممکن است مقدار منفی بارش تولید شود، که با تعریف حدود پهنای باند و تکرار تصادفی رابطه (۳) از تولید مقادیر منفی جلوگیری می‌شود.

تعیین مقادیر شدت-مدت-فراوانی بارش

تعیین این مقادیر در دوره آتی، نیازمند استخراج داده‌های حداکثر بارش ساعتی سالانه از داده‌های بارش روزانه ریزمقیاس شده در دوره آتی می‌باشد. (Nguyen et al. (1998; 1994; 1990) با استفاده از تئوری روابط چندکی خصوصیات بارش در تداوم‌های مختلف را بهم مرتبط کردند. آنها در تعیین روابط چندکی بارش از تمامی داده‌های ساعتی و روزانه موجود استفاده کردند و داده‌های بارشی حداکثر را مورد توجه قرار ندادند. این موضوع ارزیابی سطح اطمینان برآورد در احتمال تجاوز سالانه- را برای سازه‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی اگر ناممکن نسازد دچار مشکل خواهد کرد. (Wu et al. (2005) تئوری (Nguyen et al. (1998; 1994; 1990) را در استخراج

$$h_{k,s,p}^t = g_{k,s}^t(d_p) \quad (4)$$

که در آن $g_{k,s}^t(\bullet)$ فرم عمومی تابع بوده و d_p و $h_{k,s,p}^t$ به ترتیب مقادیر چندک تصادفی حداکثر بارش روزانه سالانه (D) و حداکثر بارش t -ساعته سالانه ($H_{k,s}^t$) برای k -روز بارانی و s -فصل در سطح احتمال برابر p می‌باشد. در این صورت $F_D(d_p) = Pr(D \leq d_p) = Pr(H_{k,s}^t \leq h_{k,s,p}^t) = F_{H_{k,s}^t}(h_{k,s,p}^t) = p$ (Cumulative Density Function, CDF) تابع توزیع احتمال تجمعی ($F_x(\bullet)$) کاربرد توزیع احتمال حاشیه‌ای برای D و $H_{k,s}^t$ تعیین می‌شود (شکل - ۳). بطور معمول با پذیرش کاربرد یک توزیع تک‌نمایی برای D و $H_{k,s}^t$ رابطه چندکی بین d_p و $h_{k,s,p}^t$ اکیداً صعودی خواهد بود (Wu et al., 2009).



شکل ۳- توابع توزیع حاشیه‌ای برای D و $H_{k,s}^t$

۳- نتایج

صحت‌سنجی روش تحقیق

برای صحت‌سنجی روش تحقیق، مقادیر IDF براساس یک سناریوی اقلیمی مشابه با اقلیم مشاهداتی تولید شده و با مقادیر مشاهداتی آن مقایسه می‌شود. این سناریو، سناریوی تاریخی شبیه‌سازی شده نامیده شده که در آن روند پیشین تغییر میزان غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر ثابت نگه داشته می‌شود. سناریوی تاریخی شبیه‌سازی شده بارش روزانه با در نظر گرفتن سناریوی عدم وقوع تغییر اقلیم در مدل ریزمقیاس‌نمایی K-NN - فضای نمونه‌گیری برابر آمار مشاهداتی می‌باشد- برای سه دوره شبیه‌سازی با طول‌های آماری ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ سال تولید شده است. سپس مقادیر IDF تحت این سناریو با به‌کار بردن روش چندکی و داده‌های بارش روزانه برای هر دوره شبیه‌سازی بدست آمده است. آنگاه با مقایسه مقادیر برآوردی با مشاهداتی، طول آماری مناسب که کمترین دامنه و پایدارترین میانگین خطا را دارا باشد، انتخاب می‌گردد. این صحت‌سنجی برای ایستگاه مشهد برای نمونه ارائه می‌گردد. جدول ۱ مقادیر آماره آزمون

روابط چندکی با استفاده از داده‌های حداکثر ساعتی سالانه متناظر با داده‌های حداکثر روزانه سالانه اصلاح کردند. این تئوری نسبت به روش‌های مرسوم بخصوص با کاربرد داده‌های حداکثر ساعتی سالانه با تداوم‌ها کمتر از ۶ ساعت، دارای دقت بیشتری است (Wu et al., 2005). زیرا، عمدتاً برای بارش‌های با تداوم زیاد (۱۲ ساعته) ممکن است بارش حداکثر ساعتی سالانه در روزیکه بارش حداکثر روزانه‌ی سالانه اتفاق می‌افتد، رخ ندهد. به عبارتی درست‌نمایی بارش حداکثر ساعتی سالانه که همزمان با بارش حداکثر روزانه‌ی سالانه اتفاق می‌افتد، با افزایش تداوم بارش کاهش می‌یابد. در مطالعه دیگر Wu et al. (2009) برای رفع این مشکل، رخدادهای بارشی را براساس زمان رخداد و با تعریف رخدادهای کامل و ناقص بصورت روزهای بارانی با توالی زمانی k -روزه دسته‌بندی کردند و روابط چندکی را بطور جداگانه برای هر دسته تعیین کردند. با این وجود آنها الگوی فصلی بارش را در تفکیک زمانی بارش در نظر نگرفتند. این موضوع بخصوص برای نواحی که الگوی بارش‌های در فصول مختلف متفاوت می‌باشند، از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود. به عنوان مثال رگبارهای بهاره ممکن است نسبت به زمستانه دارای مدت کمتر و شدت بیشتری باشند. بنابراین ممکن است روابط چندکی بارش مورد استفاده در تعیین مقادیر IDF برای هر فصل متفاوت باشد. از این‌رو دسته‌بندی رگبارها براساس الگوی فصلی نیز باید بررسی شوند. بدین منظور توزیع توام مقدار و مدت رگبارها با استفاده از توزیع فرانک ارشمیدسین کاپولا (Frank Archimedean Copula) پیشنهاد شده توسط Singh and Zhang (2007) به‌دست آمد و سپس یکسانی توزیع توام آنها را در فصول مختلف نسبت به هم با روش کلموگوروف - اسمیرنوف (Kolmogorov-Smirnov, K-S) مورد بررسی قرار گرفت. با انجام اینکار وجود الگوی فصلی مشخص شده و تعداد کلاس‌ها براساس این دسته‌بندی به تعداد مطلوب جهت برقراری روابط چندکی بارش تعدیل پیدا می‌کند. همچنین اگر بتوان با ترکیب کلاس‌ها با توالی روزهای بارانی متفاوت، تعداد دسته‌های رگباری را جهت برقراری روابط چندکی به گونه‌ای کاهش داد که صحت برآوردها دچار نقصان نشود، بسیار مطلوب خواهد بود. برای این منظور نیز یکسانی توزیع‌های احتمالاتی عمق بارش با توالی‌های روزهای بارانی متفاوت با استفاده از روش نیکویی برازش K-S نسبت به هم بررسی شده است. بنابراین در این تحقیق روش ارائه شده توسط Wu et al. (2009) با استفاده از داده‌های نامتناظر و برقراری روابط چندکی بر اساس الگوی فصلی و زمان رخداد رگبار توسعه داده شده است. رابطه چندکی بین حداکثر بارش روزانه و حداکثر بارش t -ساعته سالانه برای k -روز بارانی و s -فصل به شکل زیر تعریف می‌شود:

جدول ۱- مقادیر آزمون K-S و توزیع میانگین بارش ماهانه برای طول آماری ۱۲۰۰ سال

ماه	توزیع بارش روزانه		توزیع میانگین بارش ماهانه	
	روش K-S		t-test	
	آماره k	P-value	آماره t	P-value
ژانویه	۱	۰/۰۱۳۲	-۰/۰۰۷	۰/۹۹۴۴
فوریه	۱	۰/۰۱۱۹	-۰/۰۴۲	۰/۹۶۶۷
مارس	۱	۰/۰۱۲۲	-۰/۲۹۳	۰/۷۷۱۵
آوریل	۱	۰/۰۰۹۲	۰/۱۴۴	۰/۸۸۶۶
می	۱	۰/۰۱۸۵	۰/۰۷۳	۰/۹۴۲۱
ژوئن	۱	۰/۰۶۱۷	-۰/۲۹۹۸	۰/۷۶۶۱
ژوئیه	۱	۰	۰/۱۴۸۳	۰/۸۸۳۰
اوت	۱	۰	-۰/۱۳۱۳	۰/۸۹۶۳
سپتامبر	۱	۰	۰/۰۶۴۲	۰/۹۴۹۲
اکتبر	۱	۰/۰۱۷۹	-۰/۰۲۰۹	۰/۹۸۳۵
نوامبر	۱	۰/۰۰۸۹	-۰/۰۸۶۳	۰/۹۳۱۰
دسامبر	۱	۰/۰۰۸۵	-۰/۰۳۶۳	۰/۹۷۱۳

عمومی رابطه ۴ برای هر تداوم بارش بدست می‌آید. بدین منظور نکویی برازش توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) بر سری داده‌های حداکثر روزانه و ساعتی سالانه در دوره مشاهداتی با استفاده از روش K-S مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). سپس این روابط با استفاده از مقادیر چندک‌های سری‌های حداکثر بارش روزانه و ساعتی مشتق شده از این توزیع‌ها بدست می‌آیند. مقادیر حداکثر بارش روزانه سالانه مربوط به سری سناریوی تاریخی شبیه‌سازی با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ ساله با برازش توزیع GEV برآورد می‌گردد (جدول ۳). حال با جایگذاری این مقادیر در روابط چندکی بدست آمده، مقادیر IDF برای هر سه طول آماری ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ محاسبه می‌شوند. برای مشخص شدن توانایی روش پیشنهادی در برآورد مقادیر IDF و تعیین طول آماری مناسب، خطای نسبی برآوردها برای تمامی دوره‌های شبیه‌سازی نسبت به دوره مشاهداتی محاسبه گردید. شکل ۴ نشان می‌دهد که دامنه خطا با افزایش طول آماری از ۹۰۰ سال بشدت کاهش یافته اما بعد از طول ۱۲۰۰ سال تغییرات ناچیز می‌باشد. همچنین متوسط خطا در طول آماری بیش از ۱۲۰۰ سال در تمامی تداوم‌ها تقریباً یکسان بوده که نشان می‌دهد در این طول آماری مدل به یک پایداری در خطا رسیده است. به هر حال با توجه به سیاست کاهش حجم محاسبات و انتخاب طول آماری با خطای کم و پایدار، طول آماری ۱۲۰۰ سال برای ادامه شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی خطای متوسط بین ۱ تا ۳ درصد روش پیشنهادی در تولید مقادیر IDF نشان می‌دهد که این روش می‌تواند در مدل‌سازی‌ها با دقت بسیار خوب به کار گرفته شود.

میانگین بارش ماهانه و توزیع بارش روزانه را برای طول آماری ۱۲۰۰ سال نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که مدل K-NN در بازتولید میانگین (آزمون t-test) و انحراف معیار (آزمون f-test) بارش ماهانه از توانایی بالایی برخوردار است. با این حال در برخی ماه‌ها (مانند: فوریه) پراکندگی داده‌ها به دلیل چولگی زیاد بخوبی شبیه‌سازی نشده است، البته این اختلاف معنی‌دار نمی‌باشد.

از طرفی آزمون توزیع بارش روزانه شبیه‌سازی شده (K-S تست) حاکی از توانایی بالای مدل در بازتولید بارش روزانه می‌باشد. مجموع بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل K-NN در بازتولید داده‌های بارش به دور از هرگونه طول آماری منتخب عملکرد مناسبی دارد. رگبارهای ثبت شده در ایستگاه مشهد از نظر توالی بارش (زمان رخداد) به بارش‌های ۱ و ۲ روزه کلاسبندی می‌شوند. آزمون آماری یکسانی توزیع ارتفاع بارش بین کلاس‌ها - مقادیر آماری آزمون K-S و P-value به ترتیب برابر با ۰/۱۰۹۸ و ۰/۲۷۷۶ می‌باشند - نشان می‌دهد که توزیع بارش‌ها با توالی ۱ و ۲ روزه از لحاظ آماری دارای تفاوت معنی‌دار نبوده و می‌توانند در یک کلاس طبقه بندی شوند. همچنین بیشترین داده‌های رگباری ثبت شده مربوط به فصل‌های پاییز، زمستان و بهار می‌باشند. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که رخدادهای رگباری دارای الگوی فصلی مشخصی نبوده و لذا از نظر فصل رخداد نیز در یک کلاس قرار می‌گیرند.

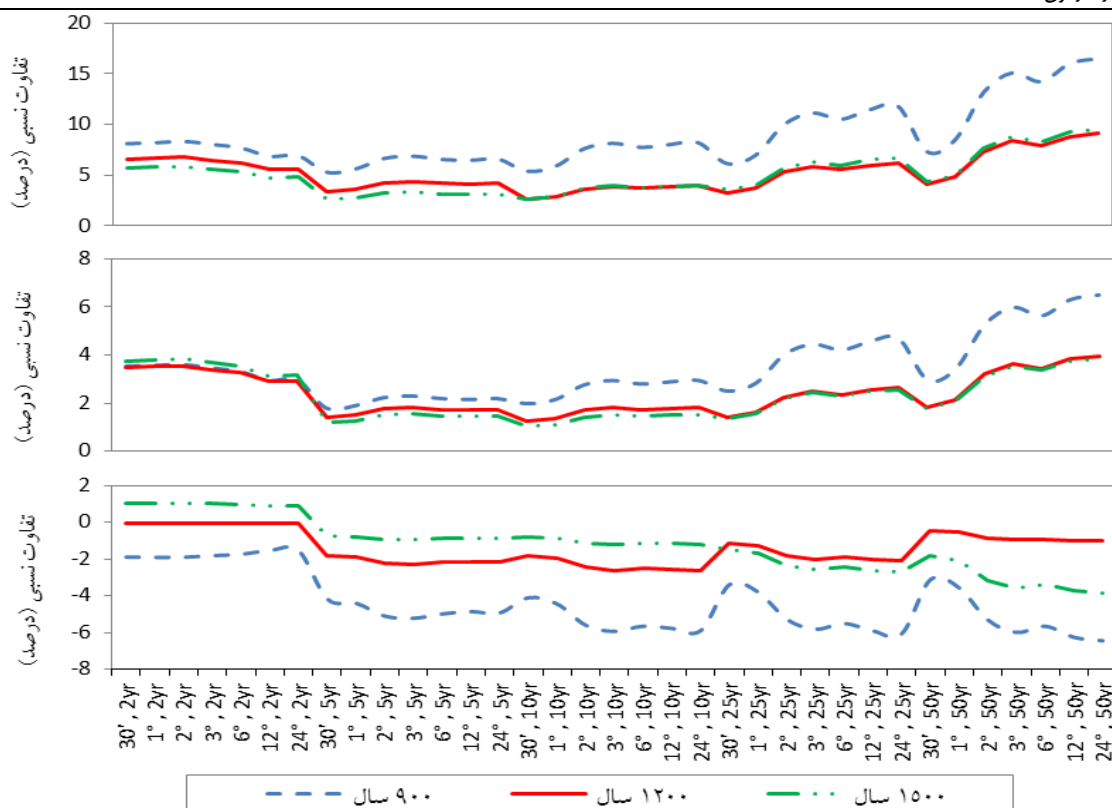
با توجه به اینکه تمامی رخدادهای در یک کلاس خلاصه می‌شوند، روابط چندکی بین حداکثر بارش روزانه و ساعتی سالانه به فرم

جدول ۲- مقادیر P-value و آماره‌ی آزمون K.S برای یکسانی توزیع توام مقدار و مدت رگبارها در فصول مختلف

فصل	فصل					
	پاییز		بهار		فصل	
	آماره‌ی آزمون	P-value	آماره‌ی آزمون	P-value	آماره‌ی آزمون	P-value
بهار	-	-	-	-	-	-
پاییز	۰/۱۳۹	۰/۴۹۷	-	-	۰/۸۶۰	۰/۴۱۵
زمستان	۰/۰۸۳	۰/۷۵۹	۰/۱۱۱	۰/۶۵۴	۰/۰۴۹	۰/۷۱۰

جدول ۳- مقادیر P-value و آماره‌ی آزمون K-S برای برازش توزیع GEV

P-value	تداوم بارش‌های رگباری (دقیقه)										
	۱۴۴۰	۱۰۸۰	۷۲۰	۵۴۰	۳۶۰	۱۸۰	۱۲۰	۶۰	۳۰	دوره شبیه سازی	دوره مشاهداتی
آماره آزمون	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۰۴۱	۰/۱۰۲
P-value	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۶۹	۰/۶۹۱	۰/۸۳۸

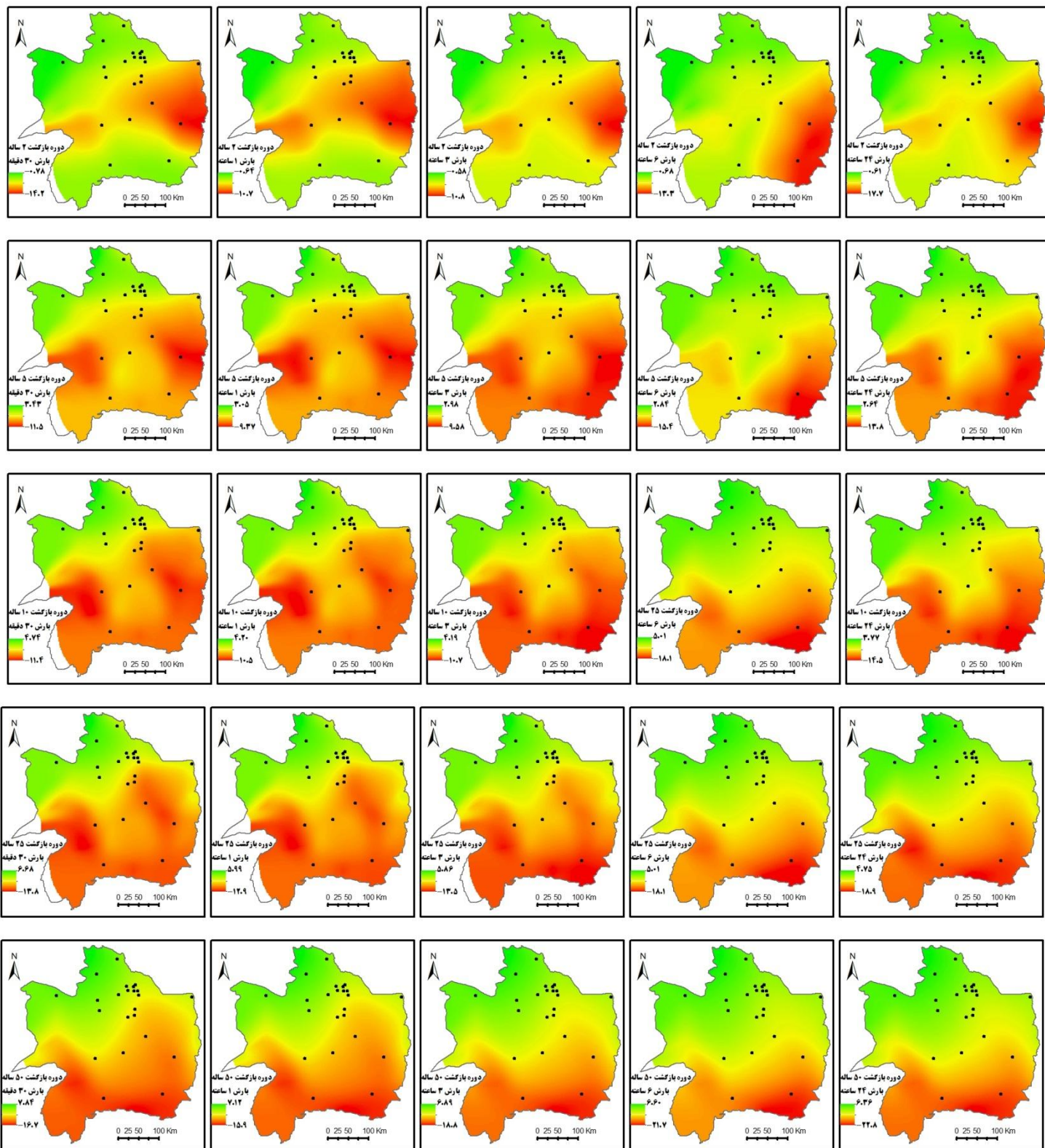


شکل ۴- مقادیر حداکثر (a)، متوسط (b) و حداقل (c) تفاوت نسبی شدت بارش با تداوم و دوره‌های بازگشت مختلف بین دوره‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برای تمامی طول‌های آماری ۹۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۵۰۰ سال

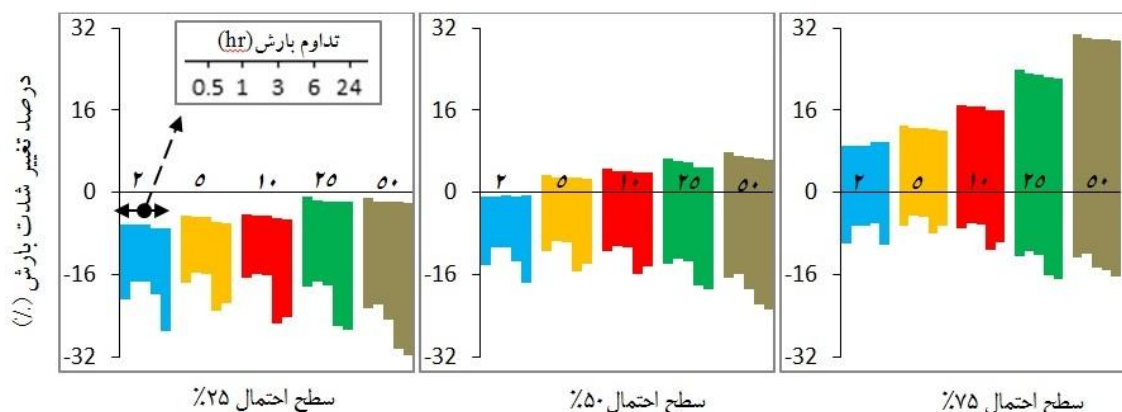
آبی خواهند بود. شکل ۵ توزیع مکانی میزان تغییر شدت بارش‌ها در پهنه استان برای دوره‌های بازگشت و تداوم‌های مختلف و برای سطح ریسک ۵۰٪ نشان می‌دهد. همچنین درصد تغییر شدت بارش‌ها را در گستره استان به تفکیک دوره بازگشت و تداوم بارش در شکل ۶ ارائه شده است.

بررسی اثر تغییر اقلیم

براساس ۱۰ سناریو تغییر اقلیم بارش مشتق شده از رابطه (۱) برای هر ایستگاه، تنها سه سناریو مربوط به سطوح احتمال ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ جهت ورود به مدل انتخاب گردید، که این سطوح به ترتیب بیانگر تغییر کاهشی تا افزایشی در شدت بارش‌های حدی در دوره



شکل ۵- توزیع مکانی تغییر شدت بارش‌ها با دوره‌های بازگشت و تداوم‌های مختلف در افق ۲۰۴۰ با سطح ریسک ۵۰٪



شکل ۶- درصد تغییر شدت بارش‌ها با تداوم و دوره بازگشت مختلف در گستره استان

ناحیه وجود ندارد. همچنین با افزایش تداوم‌ها کاهش شدت بارش‌ها محتمل‌تر به نظر می‌رسد که نشان می‌دهد در آینده بارش‌های سیل آسا با تداوم زیاد با احتمال ضعیف‌تری رخ خواهد داد. نتایج تحت سه سطح ریسک نشان داد که با پذیرش سطح ریسک کم، نواحی بیشتری از استان افزایش را در شدت‌های بارش بخصوص برای دوره‌های بازگشت بیشتر از ۱۰ سال در دوره آبی تجربه می‌کنند. این موضوع می‌تواند هشدار برای طراحی سازه‌های آبی پراهمیت بوده که برای دوره آبی ساخته می‌شوند. ارائه نتایج در این سه سطح ریسک توانسته عدم قطعیت ناشی از کاربرد مدل‌های اقلیمی مختلف را در مطالعات تغییر اقلیم فرموله کند. با این وجود نباید عدم قطعیت ناشی از کاربرد مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی نادید گرفته شود هرچند که انتخاب صحیح مدل تاحدی این محدودیت را برطرف می‌سازد. از این‌رو در این مطالعه مدل ریزمقیاس‌نمایی جهت کاربرد در مناطق خشک و نیمه خشک توسعه داده شد. با این وجود مطالعه در خصوص استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی ترکیبی با روش K-NN و مقایسه آن با نتایج این تحقیق و در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از این مدل‌ها می‌تواند ادامه دهنده این تحقیق باشد.

آزمون روش پیشنهادی برای ایستگاه مشهد نشان داد که مقادیر شدت بارش بازتولید شده نسبت به دوره مشاهداتی تنها حدود ۰/۹ تا ۶/۲ درصد با توجه به مدت بارش و دوره بازگشت بیشتر برآورد می‌شوند. بنابراین با تمام محدودیت‌های موجود این تحقیق توانسته روش قابل قبولی را برای تولید مقادیر IDF در شرایط اقلیم آینده و با استفاده از داده‌های روزانه پیدا کند. با این وجود این روش فرض می‌کند که شکل روابط چندکی بارش و تابع چگالی احتمال برای شرایط اقلیم آینده هم بدون تغییر باقی می‌ماند. این فرضیه غیرقابل اجتناب بوده و محدودیت مطالعات بشمار می‌آید، اگرچه استفاده از

شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش تداوم بارش دامنه تغییر شدت بارش‌ها به سمت کاهش سوق داده می‌شود. بطور مثال در دوره بازگشت ۵۰ ساله و سطح ریسک ۵۰٪ این دامنه از مقادیر ۱۵/۹٪ تا ۷/۱٪ در تداوم ۱ ساعته به ۲۲/۹٪ تا ۶/۲٪ برای تداوم ۲۴ ساعته تغییر خواهد کرد. همچنین با افزایش دوره بازگشت گستره تغییرات در استان بیشتر می‌شود. به‌طوریکه برای تداوم ۱ ساعته با دوره بازگشت ۲ ساله دامنه تغییرات ۱۷/۳٪ تا ۹/۱٪ به ۲۱/۸٪ تا ۳۰/۱٪ برای دوره بازگشت ۵۰ ساله افزایش پیدا می‌کند. نواحی مرکزی و بخصوص جنوبی استان شاهد کاهش بیشتر در تمامی تداوم‌ها می‌باشد، این در حالیست که با افزایش دوره بازگشت (بیش از ۱۰ سال) این نواحی با شدت بیشتری این کاهش‌ها را دریافت خواهند کرد. همچنین در سطوح ریسک کمتر نسبت به سطوح ریسک بالاتر دامنه تغییرات افزایشی تر بوده که در این بین مناطق خشک‌تر استان (نواحی جنوبی) تغییرات کاهشی و یا افزایشی بیشتری را در بین دیگر نقاط استان تجربه می‌کنند.

۴- بحث و نتیجه گیری

میزان تغییر شدت بارش‌های حداکثر فارغ از تداوم و دوره بازگشت با فرض سطح ریسک ۵۰٪ بین ۲۳٪ تا ۷/۳٪ خواهد بود. همچنین شدت بارش‌ها با دوره بازگشت ۲ ساله برای تمامی مناطق استان کاهش پیدا می‌کند که با افزایش دوره بازگشت نواحی شمالی استان افزایشی را در شدت بارش‌ها شاهد خواهند بود. این موضوع نشان می‌دهد که شدت سیل‌خیزی در مناطق پرباران استان افزایش یافته اما در مقابل مناطق جنوبی و مرکزی کاهش شدیدتری را متحمل می‌شوند. البته باید توجه داشت که تعداد ایستگاه‌های مورد استفاده در نواحی جنوب‌غربی کم بوده و همپوشانی داده‌ای خوبی در این

- daily rainfall data. *Journal of American Water Recourse Association* 11:67-76
- Nguyen VTV, Pandey GR (1994) Estimation of short-duration rainfall distribution using data measured at longer time scales. *Water Science Technology* 29(1):39-45
- Nguyen VTV, Nguyen TD, Wang H (1998) Regional estimation of short duration rainfall extremes. *Water Science Technology* 37(11):15-19
- Onof C, Arnbjerg-Nielsen K (2009) Quantification of anticipated future changes in high resolution design rainfall for urban areas. *Atmospheric Research* 92:350-363
- Pagliara S, Viti C, Gozzini B, Meneguzzo F, Crisci A (1998) Uncertainties and trends in extreme rainfall series in Tuscany, Italy: Effects on urban drainage networks design. *Water Science and Technology* 37(11):195-202
- Seyedkaboli H, Akhondali AM, Massahbavani A, Radmanesh F (2012) A downscaling modeling based on K-Nearest Neighbor (K-NN) non-parametric method. *Journal of Water and Soil* 26(4):779-808 (In Persian)
- Sharif M, Burn DH (2006) Simulating climate change scenarios using an improved K-Nearest Neighbor model. *Journal of Hydrology* 325:179-196
- Simonovic SP, Peck A (2009) Updated rainfall intensity duration frequency curves for the City of London under the changing climate. *Water Resources Research*, Report no. 065, Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada, 64p
- Simonovic SP, Li L (2003) Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 129 (5):361-372.
- Singh VP, Zhang L (2007) IDF Curves Using the Frank Archimedean Copula. *ASCE Journal of Hydrology Engineering* 12(6):651
- Solaiman TA, Simonovic SP (2011a) Quantifying uncertainties in the modelled estimates of extreme precipitation events at upper Thames river basin. *Water Resources Research*, Report no. 067, Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada, 64 p
- Solaiman TA, Simonovic SP (2011b) Development of probability based intensity-duration-frequency curves under climate change. *Water Resources*
- داده‌های ساعتی کافی در دوره مشاهداتی بخصوص برای تداوم‌های کمتر از یک ساعت و به روز کردن مداوم پایگاه داده مدل می‌تواند راهگشا باشد. همچنین استفاده از روابط غیر قطعی و احتمالاتی جهت در نظر گرفتن این محدودیت می‌تواند موضوع مناسبی برای تحقیقات بعدی باشد.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی در انجام این تحقیق سپاسگذاری می‌گردد.

۶- مراجع

- Abbaspour KC, Faramarzi M, Ghasemi SS, Yang H (2009) Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research* 45:10434
- Arnbjerg-Nielsen K (2006) Spatial and temporal variation of extreme rainfall significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water Science and Technology* 54:1-8
- Goyal M K, Burn DH, Ojha CSP (2013) Precipitation simulation based on k-nearest neighbour approach using gamma kernel. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering* 18(5):481-487
- Helfer F, Lemckert C, Zhang H (2012) Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology* 475:365-378
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007) The physical science basis—summary for policy makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva
- Madsen H, Arnbjerg-Nielsen K, Mikkelsen PS (2009) Update of regional intensity-duration-frequency curves in Denmark: Tendency towards increased storm intensities. *Atmospheric Research* 92(3):343-349
- Mailhot A, Duchesne S, Caya D, Talbot G (2007) Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology* 347:197-210
- Nguyen VTV, Chaleeraktragoon C (1990). Estimation of hourly rainfall distribution based on available

Congress, Korea Water Resources Association,
Seoul, Korea, 3698–3708

Wu SJ, Tung YK, Yang JC 2009. Incorporating daily
rainfall to derive at-site hourly depth-duration-
frequency relationships. ASCE Journal of
Hydrology Engineering 14(9):992-1001

Research, Report no. 072, Facility for Intelligent
Decision Support, Department of Civil and
Environmental Engineering, London, Ontario,
Canada, 94 p

Wu SJ, Tung YK, Yang JC (2005) A simple model to
estimate hourly rainfall DDF relationships by
incorporating daily rainfall. In Proc., 31st IAHR