

اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی مناطق خشک ایران

محمد رضا خزائی^{۱*}

m_r_khazae@yahoo.com

حدیث خزائی^۲

بهرام ثقفیان^۳

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۵

چکیده

زمینه و هدف: یکی از آثار مهم تغییر اقلیم، تغییر رژیم بارش‌های حدی در آینده است که پیش‌بینی آن برای اتخاذ تدابیر مقابله با آثار زیانبار تغییر اقلیم ضروری است. در این مقاله اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های روزانه حداکثر سالانه در مناطق خشک ایران ارزیابی شده است. روش بررسی: سناریوهای آینده توسط مدل NSRP ریزمقیاس شد. سری‌های طولانی مدت بارش روزانه برای اقلیم فعلی و سناریوهای آینده تولید شد و با مقایسه توزیع فراوانی بارش‌های حدی روزانه دوره تاریخی و سناریوهای آینده، اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی در مناطق خشک ایران ارزیابی شد. روش ریزمقیاس‌نمایی به گونه‌ای است که دامنه وسیعی از ویژگی‌های سناریوهای بزرگ‌مقیاس به سناریوهای ریزمقیاس شده منتقل شده است. ایستگاه‌های مورد مطالعه، ایستگاه‌های سینوپتیک بم، زاهدان، مهرآباد تهران و یزد به عنوان نمایندگان مناطق خشک ایران انتخاب گردید.

یافته‌ها: نتایج اعتبارسنجی نشان داد عملکرد روش مورد استفاده برای شبیه‌سازی سری بارش روزانه و توزیع بارش‌های حدی مناسب است. در اغلب ایستگاه‌ها و تحت سناریوهای مختلف انتشار، شدت بارش‌های حدی روزانه در آینده افزایش خواهد یافت. این در حالی است که بارش سالانه در آینده کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه در یزد انتظار می‌رود بارش‌های حدی ۵۰ ساله بین ۱۴ تا ۵۸ درصد افزایش یابد، اما تغییر میانگین بارش سالانه بین ۳٪ افزایش تا ۲۰٪ کاهش باشد.

بحث و نتیجه‌گیری: این نتایج بیانگر افزایش وخامت شرایط بارش در مناطق خشک ایران در آینده است. لذا انجام مطالعات وسیع‌تر و در نظر گرفتن اقدامات پیش‌گیرانه برای کاهش خسارات تغییر اقلیم آینده در این مناطق ضروری است.

واژه‌های کلیدی: بارش، تغییر اقلیم، بارش حدی، خشک، ریزمقیاس‌نمایی

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، ایران.* (مسوول مکاتبات)

۲- دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳- استاد، دانشکده فنی مهندسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Climate Change Impact on Extreme Rainfalls in Arid Region of Iran

Mohammad Reza Khazaei^{1*}

m_r_khazae@yahoo.com

Hadis Khazaei²

Bahram Saghafian³

Accepted: 2019.03.16

Received: 2018.12.04

Abstract

Background and Objective: One of the major impacts on climate changes is change in extreme precipitation regime in the future, which have to be predicted to counteract the harmful effects of climate change. In this paper, climate change impact is assessed on extreme rainfalls in arid regions of Iran.

Method: Future scenarios are downscaled using the NSRP model. Long-term daily rainfall series are generated for current climate and future scenarios. By comparing the distribution of extreme daily rainfalls for current and future conditions, the impacts of climate change on extreme rainfalls are assessed. In downscaling method, a wide range of statistics of large-scale scenarios has been transferred to downscaled scenarios. The understudying stations are in Bam, Zahedan, Tehran and Yazd synoptic stations as representatives of the arid regions of Iran.

Findings: Validation results indicate that the performance of this method in simulating daily rainfall series and distribution of extreme rainfall is acceptable. Results for most of stations and scenarios show that intensity of extreme daily rainfalls will increase in the future while average rainfall will decrease. As instance, in Yazd, extreme rainfall of 50 years return period would increase between 14 to 58 percent, while the average precipitation will change between +3 to -20 percent.

Discussion and Conclusion: These results indicate that the precipitation situation in arid areas of Iran will worsen in the future. Therefore, more extensive investments and taking preventive activities to adapt to climate change is essential.

Keywords: Extreme Rainfall, Climate Change, Rainfall, Arid, Downscaling

-
- 1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Iran (Correspondence Author)
 - 2- Faculty of Engineering, Tehran Branch of Science and Research, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 - 3- Professor, Faculty of Engineering, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

مقدمه

تغییر نوسانات می‌تواند مهم‌تر از تغییر میانگین‌ها باشد (۱۳). علاوه بر آن، استفاده از روش CFS، در کاهش مقیاس بارش روزانه عدم قطعیت زیادی دارد (۱۴). در مواردی دیگر نیز دیده شده که از مدل‌های استوکستیک مولد آب و هوا (WG^4) از جمله LARS WG⁵، SDSM⁵ و WGEN⁶ استفاده شده است. در این مدل‌ها از مدل‌های صرفاً آماری بارش استفاده شده است (۳، ۱۵، ۱۶ و ۱۷). این مدل‌ها اگرچه گشتاورهای درجه پایین و رفتار خشک-تر بارش را به خوبی بازتولید می‌کنند، اما قادر به بازتولید صحیح بارش‌های حداکثر نیستند (۱۲، ۱۹-۱۷).

مدل NSRP⁷ که در مطالعات ارزیابی اثر تغییر اقلیم کم‌تر مورد توجه بوده است (۱۱ و ۱۹)، یک مدل نیمه فیزیکی استوکستیک تولید بارش است که نشان داده است از قابلیت ویژه‌ای برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش روزانه و به ویژه بر بارش‌های حدی برخوردار است (۱۱، ۱۹ و ۲۰). این مدل در مطالعاتی (که اغلب در مناطق مرطوب بوده است) برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر بارش روزانه و بارش‌های حدی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است (۱۱، ۲۱ و ۲۳). در این پژوهش عملکرد مدل NSRP برای تولید سری بارش‌های روزانه و همچنین توزیع بارش‌های حدی مناطق خشک بررسی شده و با استفاده از آن اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی در مناطق خشک ایران (یزد، بم، زاهدان و تهران) ارزیابی شده است.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه بر روی چهار ایستگاه سینوپتیک بم، یزد، زاهدان و مهرآباد تهران انجام شده است که طبق روش طبقه بندی اقلیمی دومارتون دارای اقلیم خشک می‌باشند. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو کره زمین، موجب روند افزایشی دمای کره زمین و تغییر اقلیم می‌شود. بر مبنای سناریوهای منتشر شده توسط هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC¹)، پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آینده نیز وضعیت اقلیم کره زمین پیوسته در تغییر باشد (۲۰). یکی از آثار مهم تغییر اقلیم، تغییر شدت و فراوانی بارش‌های حدی است (۲). طبق نتایج به دست آمده از مطالعات متعدد، در مناطق زیادی از دنیا شدت بارش‌های حدی مشاهداتی افزایش یافته است (۳-۶). و پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز شدت و فراوانی بارش‌های حدی در بسیاری از نقاط دنیا افزایش یابد (۲). لذا استفاده از روش‌های سنتی تحلیل ریسک سیل (از جمله روش تحلیل فراوانی) که از داده‌های مشاهداتی گذشته با فرض ثابت بودن اقلیم استفاده می‌کند، برای تحلیل ریسک بارش‌های آینده معتبر نیست. در نتیجه، برای آن دسته از طرح‌های مهندسی که متأثر از بارش‌های سیل‌زا هستند و در آینده مورد بهره‌برداری و استفاده قرار می‌گیرند، لازم است از روش‌هایی استفاده شود که اثر تغییر اقلیم را در نظر بگیرد (۷-۹). مدل‌های عددی گردش عمومی (GCM^2) به عنوان معتبرترین وسیله برای تولید سناریوهای اقلیمی (از جمله بارش) آینده مطرح هستند (۱۰). اما خروجی این مدل‌ها بزرگ مقیاس است و برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی یک منطقه، باید به روشی مناسب، ریز مقیاس شود. اگرچه روش‌های بسیاری برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی GCM ‌ها توسعه یافته است، اما اغلب این روش‌ها در بازتولید صحیح بارش‌های حداکثر آینده با کاستی‌هایی مواجهند (۱۱ و ۱۲) در اغلب مطالعات گذشته از روش عامل تغییرات (CFS^3) استفاده شده است. در این روش تنها میانگین متغیرهای اقلیمی بر اساس سناریوی آینده تنظیم می‌شود و تغییر در نوسانات نادیده گرفته می‌شود. این درحالی است که در مطالعات مقادیر حدی،

4- Weather Generators
5- Statistical DownScaling Model
6- Weather GENERator
7- Neyman-Scott Rectangular Pulse

1- General Circulation Model
2- Change Factors

Table 1-Characteristics of weather stations used in the study

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

نام ایستگاه	میانگین دمای سالانه (°C)	میانگین بارش سالانه (mm)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
بم	۲۳	۶۲	۰۲۹ ۰۶'	۰۵۸ ۲۱'
یزد	۱۹/۱	۶۵	۰۳۱ ۲۴'	۰۵۴ ۲۴'
زاهدان	۱۸/۳	۸۰	۰۲۹ ۲۸'	۰۶۰ ۵۳'
تهران	۱۷/۴	۲۴۱	۰۳۵ ۴۱'	۰۵۱ ۱۹'

از سری بارش روزانه دوره ۳۰ ساله ۲۰۰۰-۱۹۷۱ ثبت شده
این ایستگاه‌ها و خروجی‌های روزانه مدل CGCM3 مربوط به
دو دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و دوره آینده ۲۰۳۶-۶۵ استفاده
شده است. خروجی‌های مدل CGCM3 برای سناریوهای
اقلیمی A1B، A2 و B1 است. این سناریوها به ترتیب حالات
غلظت متوسط، غلظت زیاد و غلظت کم گازهای گلخانه‌ای

هستند و دامنه وسیعی از حالات ممکن انتشار گازهای گلخانه-
ای در آینده را در بر می‌گیرند.
شبیه سازی بارش و کاهش مقیاس
مدل NSRP یک مدل نیمه فیزیکی است که فرایندهای
فیزیکی ساختار بارش را توسط روش‌های آماری توصیف می-
کند. فرایند مدل‌سازی در مدل NSRP طی ۴ مرحله (شکل
۱) تشریح می‌شود (۲۳):

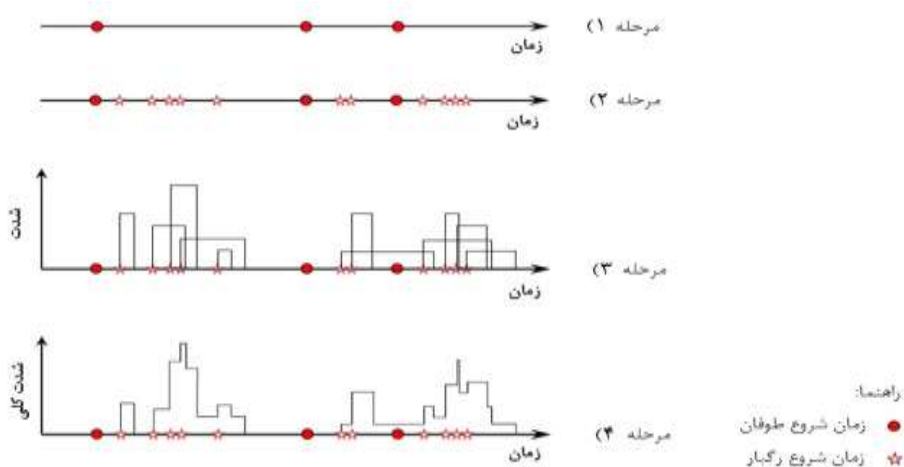


Fig 1- Schematic of the NSRP model

شکل ۱- نمودار مدل NSRP

۱- در این مدل در ابتدا زمان شروع وقایع بارش (طوفان‌ها)، به
صورت مستقل و تصادفی توسط یک فرایند پواسون تولید
می‌شود.

۲- شروع هر طوفان، مبدا رخداد تعداد تصادفی C رگبار
(سلول بارش) می‌شود که C برای هر طوفان از یک توزیع

$$P[N(t) = K] = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^K}{K!} \quad K = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

احتمال وقوع تعداد K طوفان تا زمان t، و λ

متوسط تعداد طوفان‌ها در واحد زمان است.

۳- شروع هر طوفان، مبدا رخداد تعداد تصادفی C رگبار
(سلول بارش) می‌شود که C برای هر طوفان از یک توزیع

اطلاعات بیشتر در مورد مدل NSRP توسط Burton و همکاران (۲۰۰۸) و Khazaei و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شده است.

برای ارزیابی عملکرد مدل، لازم است آماره‌های سری زمانی تولید شده و مشاهداتی با هم مقایسه شود. برای این منظور در ابتدا ۱۰۰ سری بارش هم‌طول با سری‌های مشاهداتی (۳۰ ساله)، توسط مدل واسنجی شده تولید می‌شود. این تکرار به دلیل تغییرپذیری نمونه‌گیری^۱ است. برای هر یک از سری‌های ۳۰ ساله تولید شده، آماره‌های بارش محاسبه شده و میانگین و حدود اطمینان^۲ ۹۰٪ (حدودی که ۹۰ درصد آماره سری‌های تولید شده در آن قرار دارند)، با آماره‌های متناظر سری مشاهداتی مقایسه می‌شود. قرارگیری آماره‌های سری مشاهداتی در حدود تعیین شده، حاکی از نکویی عملکرد مدل در سطح احتمال مورد نظر است (۱۲، ۱۹ و ۲۴).

روش کاهش مقیاس سناریوهای بارش و تولید سناریوهای طولانی مدت بارش آینده توسط مدل NSRP برای هر یک از سناریوهای انتشار و در هر ایستگاه به شرح زیر است: ۱- از سری‌های بارش روزانه خروجی GCM برای دوره کنترل و سناریوی آینده، آماره‌های روزانه مورد نیاز مدل NSRP محاسبه می‌شود. ۲- برای هر آماره، نسبت مقدار آینده به مقدار دوره کنترل خروجی‌های GCM محاسبه می‌شود و این نسبت در مقدار آماره متناظر مشاهداتی ضرب می‌شود تا آماره ریز مقیاس شده‌ی آینده به دست آید. ۳- سپس مدل NSRP با استفاده از آماره‌های ریزمقیاس شده، واسنجی شده و سناریوهای ریزمقیاس طولانی مدت بارش روزانه‌ی اقلیم آینده تولید می‌شود (۱۹).

سپس توزیع فراوانی بارش‌های حداکثر روزانه برای دوره گذشته و هر یک از سناریوهای آینده، از سری‌های تولید شده توسط NSRP استخراج می‌شود. با مقایسه توزیع‌های فراوانی بارش‌های حدی گذشته و آینده، اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی ارزیابی می‌شود (۱۱).

پواسون با میانگین ν به صورت مستقل و تصادفی تولید می‌شود. فاصله زمانی شروع هر یک از رگبارها نسبت به زمان شروع طوفان نیز از یک توزیع نمایی با پارامتر β به صورت مستقل و تصادفی تعیین می‌شود.

$$f(t) = \beta e^{-\beta t} \quad t > 0 \quad (2)$$

که $f(t)$ ، تابع چگالی احتمال فاصله زمانی رخ دادن هر رگبار نسبت به زمان شروع طوفان (t) ، و β^{-1} متوسط فاصله زمانی شروع رگبارها نسبت به زمان شروع طوفان است.

۳- سپس به هر رگبار به صورت تصادفی، یک مدت و یک شدت اختصاص داده می‌شود. مدت هر رگبار از یک توزیع نمایی با پارامتر η به صورت تصادفی و مستقل تعیین می‌شود.

$$f(l) = \eta e^{-\eta l} \quad l > 0 \quad (3)$$

که در آن $f(l)$ ، تابع چگالی احتمال مدت هر رگبار (l) ، و η^{-1} متوسط مدت رگبارها است.

شدت هر رگبار با یک توزیع نمایی با پارامتر ξ به صورت تصادفی و مستقل تعیین می‌شود.

$$f(x) = \xi e^{-\xi x} \quad x > 0 \quad (4)$$

که در آن $f(x)$ ، تابع چگالی احتمال شدت هر رگبار (x) ، و ξ^{-1} متوسط شدت رگبارها است.

۴- شدت بارش در هر لحظه، از جمع شدت رگبارهای فعال در آن لحظه به دست می‌آید. این فرایند به صورت پیوسته زمانی است، بنابراین سری زمانی از تفکیک فرایند در گام زمانی مورد نظر به دست می‌آید. معمولاً داده‌های بارش مشاهداتی به صورت میزان کل بارش در یک گام زمانی معین ارائه می‌شود. لذا اگر $y(t)$ شدت کل بارش در زمان t باشد، بارش تجمعی گام زمانی i ام با مدت h از رابطه زیر به دست می‌آید.

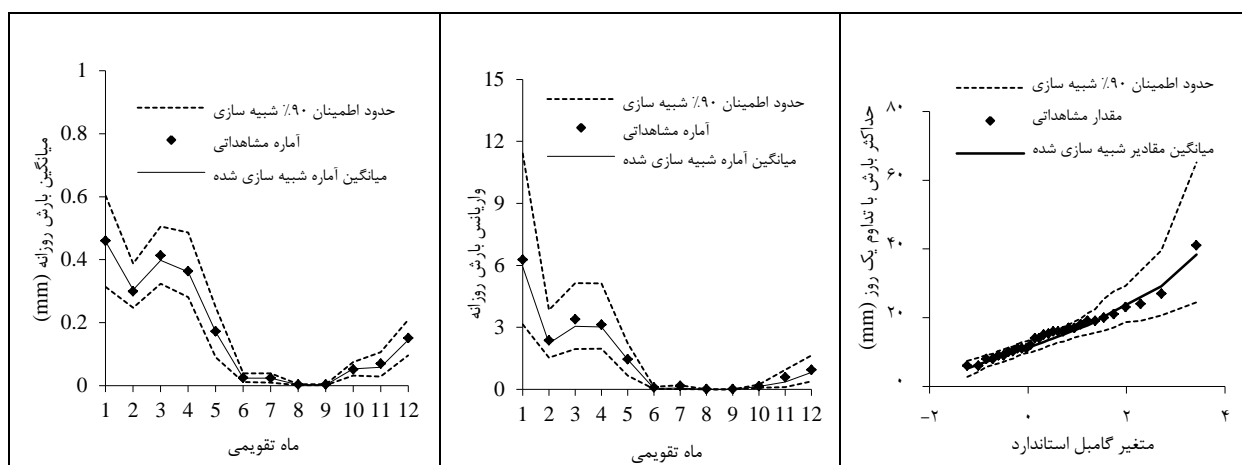
$$y_i^{(h)} = \int_{(i-1)h}^h y(t) dt \quad (5)$$

پنج پارامتر مدل $(\lambda, \beta, \eta, \nu, \xi)$ توابعی از آماره‌های بارش هستند و از طریق واسنجی توسط یک فرایند بهینه‌یابی و با استفاده از آماره‌های بارش مشاهداتی به دست می‌آیند.

نتایج و بحث

سازی بارش‌های حداکثر روزانه است. این نتایج حاکی از عملکرد موفق مدل در شبیه‌سازی بارش روزانه و بازتولید بارش‌های حدی این ایستگاه است. عملکرد مدل در سایر ایستگاه‌ها نیز بررسی شد که مشابه عملکرد آن در ایستگاه بم، خوب بود. اگرچه مدل NSRP بیشتر در مناطق مرطوب اعتبارسنجی شده و عملکرد موفقیت آمیزی نشان داده است (۱۱، ۱۹ و ۲۲)، نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد مدل NSRP در مناطق خشک نیز خوب است. Khazaei و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد مدل NSRP را در چند ایستگاه با اقلیم خشک در شمال شرقی ایران با عملکرد مدل LARS-WG مقایسه کردند و نتیجه گرفتند، عملکرد مدل NSRP بسیار خوب و بهتر از عملکرد مدل LARS-WG است. نتایج این پژوهش، علاوه بر همسویی با مطالعات انجام شده در مناطق مرطوب (۱۱، ۱۹، ۲۲-۲۱) با نتایج Khazaei و همکاران (۲۰۱۳) برای مناطق خشک نیز همسو است.

مدل NSRP برای ۴ ایستگاه بم، یزد، زاهدان و تهران واسنجی شد. برای واسنجی مدل از ۷ آماره بارش روزانه شامل میانگین بارش روزانه، واریانس بارش روزانه، چولگی بارش روزانه، ضریب خودهمبستگی بارش روزانه، نسبت روزهای تر، احتمال وقوع روز تر پس از روز تر و احتمال وقوع روز خشک پس از روز خشک استفاده شد. در شکل ۲ نتایج اعتبارسنجی مدل برای ایستگاه بم، به عنوان نمونه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه ماه‌های سال میانگین‌ها و واریانس‌ها در داخل دامنه ۹۰٪ مقادیر متناظر از سری‌های تولید شده قرار دارد که مبین عملکرد خوب مدل در بازتولید این آماره‌ها است. اگرچه بارش‌های حدی مستقیماً در واسنجی مدل NSRP شرکت نکرده‌اند، اما مشاهده می‌شود که توزیع‌های مشاهداتی عموماً در حدود اطمینان ۹۰٪ توزیع‌های متناظر تولید شده قرار دارد و این نشان دهنده عملکرد بسیار خوب برای شبیه-



شکل ۲- عملکرد مدل NSRP برای ایستگاه بم

Fig 2- NSRP model performance for the Bam station

شد. در شکل ۳ میانگین ماهانه بارش اقلیم تاریخی و سناریوهای آینده برای هر ایستگاه مقایسه شده است. در ایستگاه‌های بم و زاهدان طی همه سناریوهای انتشار و در اغلب ماه‌های سال کاهش چشم‌گیر بارندگی در آینده قابل انتظار است. به گونه‌ای که بر اساس سناریوهای انتشار مختلف انتظار می‌رود در آینده میانگین بارش سالانه در ایستگاه بم بین ۱۲ تا

پس از اعتبارسنجی و اطمینان از نکویی عملکرد مدل، سناریوهای A1B, A2 و B1 برای هر ایستگاه ریز مقیاس شد و ۱۰۰ سری ۳۰ ساله (۳۰۰۰ سال) بارش برای هر سناریوی آینده (۲۰۳۶-۲۰۶۵) در هر ایستگاه تولید شد. با مقایسه میانگین ماهانه و توزیع بارش‌های روزانه حدی بارش دوره تاریخی و سناریوهای آینده، اثر تغییر اقلیم بر بارش ارزیابی

افزایش و در فصل‌های بهار و تابستان کاهش بارش مشاهده می‌شود. اما تغییر بارش سالانه کوچک و بین ۵ درصد افزایش تا ۱۰ درصد کاهش بر اساس سناریوهای مختلف است. چنین تغییری در سیکل بارش تهران و کاهش بارش در سایر ایستگاه-های مورد بررسی می‌تواند موجب بحرانی‌تر شدن وضعیت منابع آبی در آینده شود که این نتایج نیاز به اتخاذ تدابیر آمادگی و سازگاری با شرایط تغییر اقلیم آینده در مناطق خشک ایران را هشدار می‌دهد.

۲۹ درصد و در ایستگاه زاهدان بین ۱۳ تا ۲۸ درصد کاهش یابد. البته در بعضی از ماه‌ها (از جمله سپتامبر) نیز بارندگی می‌تواند در بم و زاهدان افزایش یابد. در ایستگاه یزد نیز کاهش بارندگی در بیشتر ماه‌های سال مشهود است، ضمن آن‌که در پائیز و ابتدای زمستان احتمال بیشتر بر افزایش میانگین بارش است. میانگین سالانه بارش تحت سناریوهای B1 و A2 به ترتیب ۲ و ۳ درصد افزایش و بر اساس سناریوی A1B، ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. در تهران نکته قابل توجه تغییر سیکل فصلی بارش در آینده است. به این معنی که در فصل پاییز

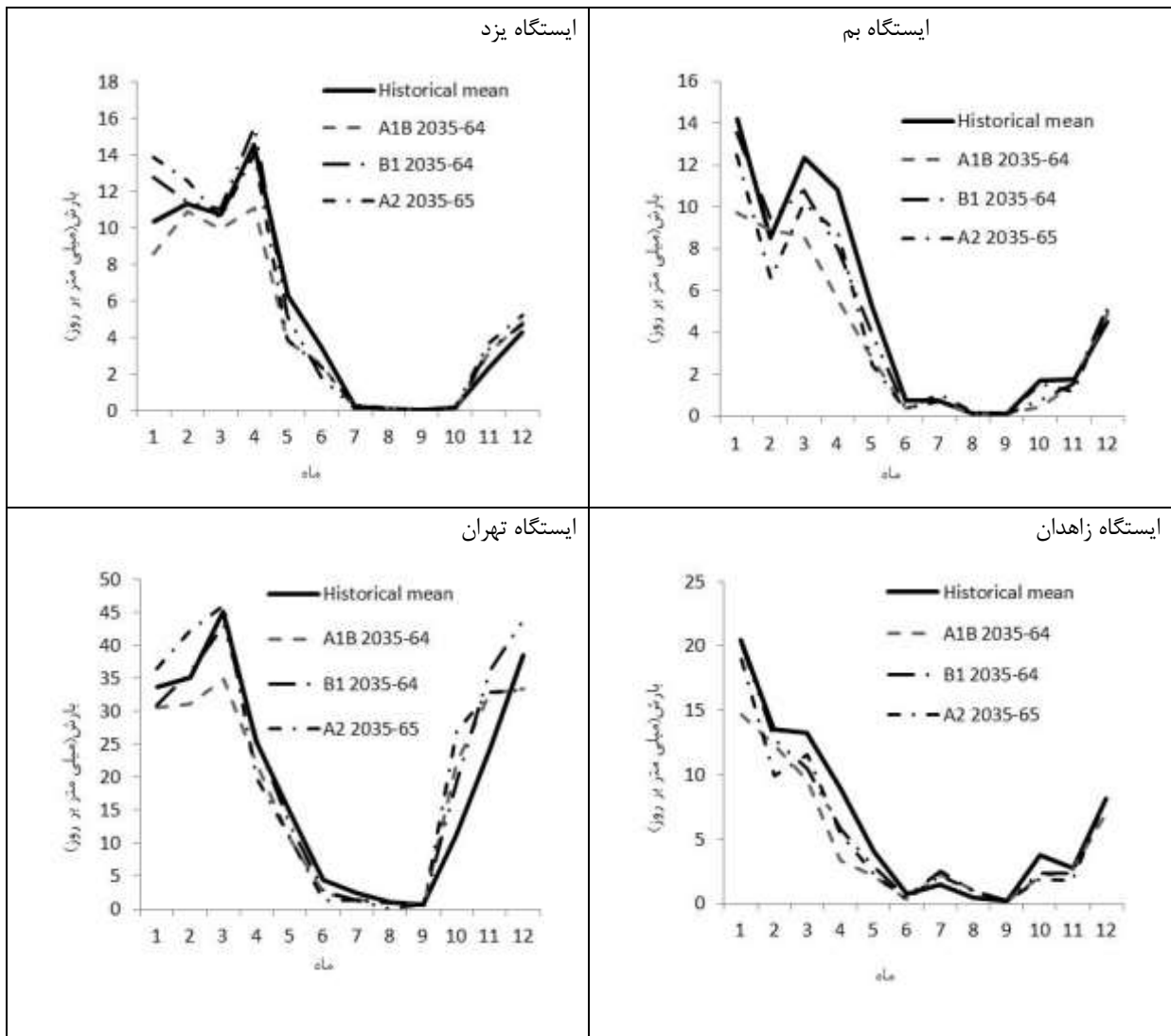


Fig 3- Climate change impact on monthly mean rainfall

شکل ۳- اثر تغییر اقلیم بر میانگین بارش ماهانه

می‌شود. در ایستگاه زاهدان، حداکثر بارش روزانه ۲ ساله بین ۱۷٪ تا ۱۰٪ کاهش، و برای بارش ۵۰ ساله بین ۲٪ تا ۱۰٪ افزایش پیش‌یابی می‌شود.

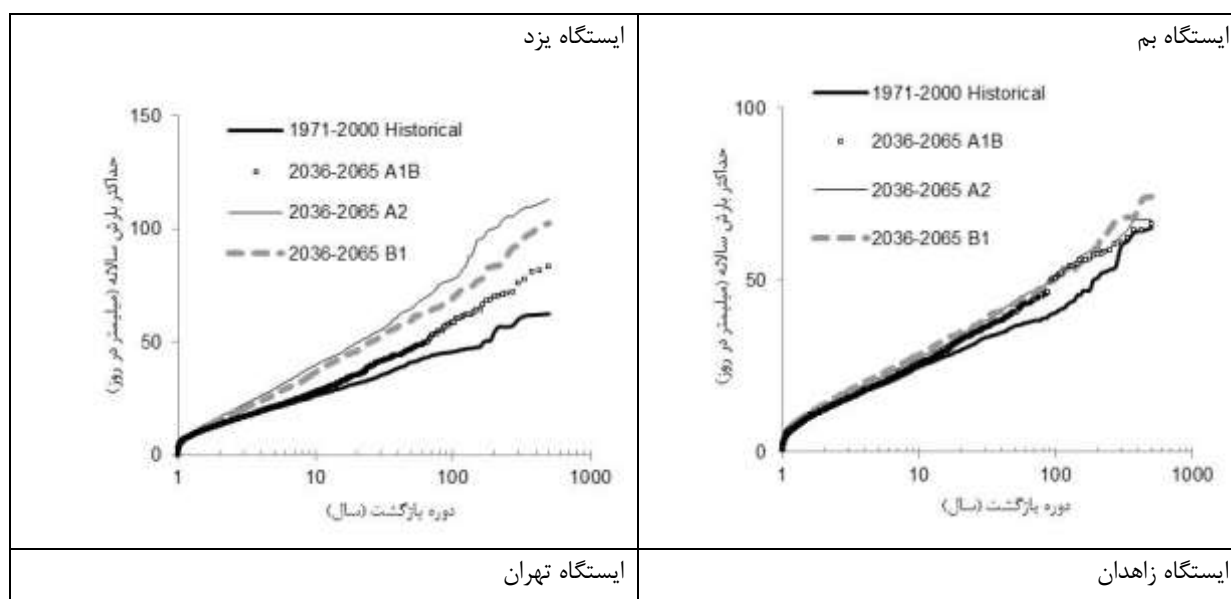
اما در ایستگاه‌های یزد و تهران افزایش بزرگی بارش‌های سیل‌زا تحت همه سناریوهای آینده قابل توجه است. در ایستگاه تهران، پیش‌یابی می‌شود حداکثر بارش روزانه برای دوره بازگشت ۲ ساله بین ۱۰٪ تا ۲۲٪، و برای دوره بازگشت ۵۰ ساله بین ۴۶٪ تا ۸۹٪ افزایش یابد. در ایستگاه یزد انتظار می‌رود بزرگی بارش ۲ ساله تا ۲۸٪ و ۵۰ ساله بین ۱۴ تا ۵۸ درصد افزایش یابد.

در شکل ۴ توزیع فراوانی بارش‌های حداکثر روزانه آینده ایستگاه‌های مورد مطالعه تحت سناریوهای انتشار مختلف، با توزیع متناظر بارش‌های دوره تاریخی مقایسه شده است. و در جدول ۲ درصد تغییر بارش‌های با دوره بازگشت‌های ۲ و ۵۰ سال سناریوهای آینده نسبت به مقادیر متناظر دوره تاریخی ارائه شده است. در ایستگاه بم و زاهدان تغییر بارش‌های حدی در اقلیم آینده نسبتاً کوچک است. به عنوان نمونه بر اساس سناریوهای انتشار مختلف، در ایستگاه بم تغییر حداکثر بارش روزانه ۲ ساله بین ۹٪ کاهش تا ۵٪ افزایش خواهد بود. این مقدار برای بارش ۵۰ ساله بین ۱۱٪ تا ۱۸٪ افزایش پیش‌یابی

Table 2- Percentage change of future extreme daily precipitation

جدول ۲- درصد تغییر بارش‌های حدی روزانه آینده

دوره بازگشت ۲ سال			مقادیر تاریخی (mm)	دوره بازگشت ۵۰ سال			مقادیر تاریخی (mm)	نام ایستگاه
۲۰۳۶-۶۵	A1B%	A2%		۲۰۳۶-۶۵	A1B%	A2%		
B1%				B1%				
۵	-۹	۲	۱۳/۲	۱۸	۱۱	۱۸	۳۶/۷	بم
۱۹	-۱	۲۸	۱۳/۲	۴۶	۱۴	۵۸	۴۱	یزد
-۸	-۱۷	-۱۱	۱۵/۶	۴	۲	۱۰	۴۰/۷	زاهدان
۲۲	۱۰	۲۲	۲۳/۵	۷۲	۴۶	۸۹	۵۲/۷	تهران



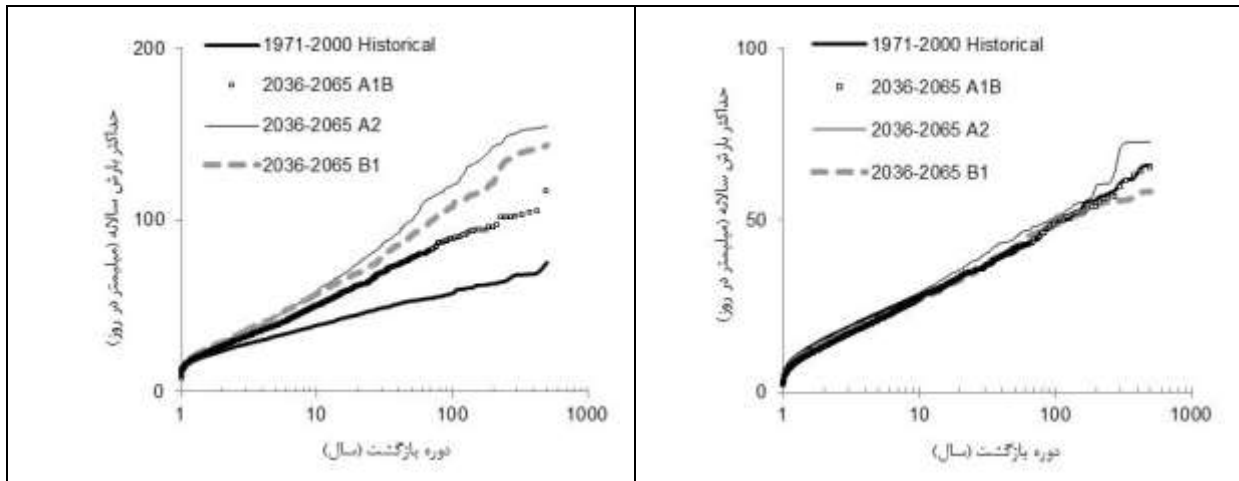


Fig. 4- Climate change impact on maximum daily rainfalls

شکل ۴- اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حداکثر روزانه

همکاران (۲۰۰۱) و Prudhomme و همکاران (۲۰۰۲) را در خصوص اعتبار روش عامل تغییر را تأیید می‌کند (۱۴-۱۳). این موضوع حاکی از لزوم در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم در طرح‌های آینده و تدارک اقدامات پیشگیری از خسارات تغییر اقلیم برای طرح‌های وابسته به بارش و بارش‌های سیل‌زا در مناطق خشک ایران است.

نتیجه‌گیری

از آثار مهم تغییر اقلیم، افزایش شدت و فراوانی بارش‌های حدی در آینده است. اما مطالعات اندکی به طور مستقیم به این موضوع پرداخته‌اند. به ویژه در مناطق خشک، به ندرت اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی توسط یک روش مناسب مطالعه شده است. اگرچه روش‌های کاهش مقیاس زیادی برای اهداف مختلف توسعه یافته است، اما تعداد اندکی از این روش‌ها از دقت و کفایت مناسب برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی برخوردارند. در این تحقیق از مدل استوکستیک NSRP برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر توزیع فراوانی بارش‌های حدی چهار ایستگاه سنوپتیک یزد، مهرآباد تهران، بم و زاهدان که در مناطق خشک ایران واقع هستند، استفاده شده است. نتایج اعتبارسنجی مدل NSRP مبین عملکرد خوب مدل در بازتولید آماره‌های مختلف بارش روزانه و توزیع بارش‌های حدی در همه ایستگاه‌های مورد بررسی است. با استفاده از مدل NSRP

افزایش بزرگی بارش‌های حدی در ایستگاه‌های تهران و یزد قابل توجه است، ضمن آن‌که در دوره بازگشت‌های بالا (مثلاً ۵۰ سال)، بارش‌های حدی در همه ایستگاه‌های مورد بررسی و تحت همه سناریوها افزایش خواهد یافت. نتایج این تحقیق، با جمع بندی (IPCC (2012) که پیش‌بینی نموده است که شدت و فراوانی بارش‌های حدی برای بسیاری از نقاط جهان و به ویژه برای عرض‌های میانی کره زمین تا پایان قرن ۲۱ افزایش خواهد یافت، همسو است. این در حالی است که میانگین‌های بارش در آینده، در اغلب موارد گرایش به کاهش دارد. به ویژه در بم با وجود کاهش میانگین بارش ماهانه در اغلب ماه‌های سال و از جمله ماه‌های پر باران، بارش‌های روزانه‌ی حدی به مقدار زیادی افزایش خواهد یافت. این موضوع می‌تواند به این علت باشد که با وجود کاهش میانگین ماهانه بارش، تعداد روزهای بارانی نیز کاهش بیشتری یافته و منجر به افزایش شدت بارش روزهای بارانی می‌شود. این موضوع اهمیت استفاده از مدل‌های WG از جمله مدل NSRP که تغییرات ویژگی‌های مختلف بارش آینده را به طور همزمان در سری‌های کاهش مقیاس یافته در نظر می‌گیرند، نشان می‌دهد. بر این مبنای نتایج روش‌هایی همچون روش عامل تغییر برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی، با عدم قطعیت زیادی روبرو است و این نتایج تردیدهای مطرح شده توسط Reynard و

افزایش و در فصل‌های بهار و تابستان کاهش بارش قابل انتظار است.

به طور کلی در ایستگاه‌های مورد مطالعه به عنوان نماینده مناطق خشک ایران، در اثر تغییر اقلیم در آینده، بزرگی بارش-های حدی سیل‌زا گرایش به افزایش دارد و میانگین بارش سالانه گرایش به کاهش دارد. این موضوع حاکی از افزایش وخامت وضعیت بارش در اقلیم آینده در هر دو زمینه منابع آب و خسارات سیل در این مناطق است. لذا در نظر گرفتن اثرات تغییر اقلیم در طرح‌های آینده و تدارک اقدامات پیشگیری از خسارات تغییر اقلیم در مناطق خشک ایران ضروری است. در این تحقیق برای دستیابی به نتایج مطمئن‌تر، عدم قطعیت سناریوهای انتشار و نوسانات اقلیم مورد توجه قرار گرفته است و از یک روش ریزمقیاس‌نمایی مناسب و متناسب با اهداف تحقیق استفاده شده است. اما نتایج این تحقیق با استفاده از خروجی‌های یک مدل GCM بوده است و پیشنهاد می‌شود نتایج با استفاده از مدل‌های GCM مختلف به همین روش انجام شود تا عدم قطعیت مدل‌های GCM نیز در نتایج دیده شود و نتایج مطمئن‌تری برای اتخاذ تصمیمات کاربردی حاصل شود.

منابع

1. IPCC 2001. Climate change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. UK: Cambridge University Press.
2. IPCC. 2012. Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge

سناریوهای اقلیمی مدل CGCM3 تحت سه سناریوی A2، A1B و B1 برای ایستگاه‌های مورد بررسی ریزمقیاس‌شد. در فرایند ریزمقیاس‌نمایی، طیف وسیعی از ویژگی‌های سناریوهای بزرگ مقیاس بارش در سناریوهای کاهش مقیاس یافته حفظ شد که این از قابلیت‌های مدل NSRP است. برای کاهش عدم قطعیت نوسانات اقلیم، ۳۰۰۰ سال (۱۰۰ سری ۳۰ ساله) بارش روزانه برای اقلیم تاریخی و هریک از سناریوهای آینده برای هر ایستگاه تولید شد. با مقایسه توزیع بارش‌های حدی سناریوهای آینده (۶۵-۲۰۳۶) و دوره تاریخی (۲۰۰۰-۱۹۷۱) اثر تغییر اقلیم بر توزیع بارش‌های حدی سیل‌زا در مناطق خشک ایران ارزیابی شد.

در ایستگاه‌های یزد و تهران شدت بارش‌های سیل‌زا تحت همه سناریوهای آینده به مقدار قابل توجه افزایش می‌یابد. پیش‌یابی می‌شود شدت بارش‌های حدی روزانه با دوره بازگشت ۵۰ سال در ایستگاه تهران بین ۴۶ درصد تا ۸۹ درصد و در ایستگاه یزد بین ۱۴ درصد تا ۵۸ درصد افزایش یابد. در ایستگاه بم و زاهدان تغییرات بارش‌های حدی در آینده نسبتاً کوچک است. بر اساس سناریوهای انتشار مختلف انتظار می‌رود شدت بارش‌های حدی روزانه با دوره بازگشت ۵۰ سال در بم بین ۱۱٪ تا ۱۸٪ و در زاهدان بین ۲٪ تا ۱۰٪ افزایش یابد.

مقایسه میانگین ماهانه بارش اقلیم تاریخی و سناریوهای مورد بررسی آینده نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های بم و زاهدان طی همه سناریوهای انتشار و در اغلب ماه‌های سال، بارندگی به مقدار قابل توجه کاهش خواهد یافت. به گونه‌ای که انتظار می‌رود میانگین بارش سالانه آینده در بم بین ۱۲ تا ۲۹ درصد و در زاهدان بین ۱۳ تا ۲۸ درصد کاهش یابد. در ایستگاه یزد نیز کاهش بارندگی در بیشتر ماه‌های سال مشهود است، ضمن آن‌که در پاییز و ابتدای زمستان احتمال بیشتر بر افزایش میانگین بارش ماهانه است. میانگین سالانه بارش یزد می‌تواند از ۳ درصد افزایش تا ۲۰ درصد کاهش یابد. در تهران تغییر بارش سالانه بین ۵ درصد افزایش تا ۱۰ درصد کاهش است، اما تغییر سیکل فصلی بارش قابل توجه است. به گونه‌ای که در پاییز

10. Khazaei, M.R., Khazaei, H., 2018. Scenarios In Climate Change Impact Assessment on Monthly Stream-flow of Karun Basin. *Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), pp. 29-40 (In Persian)
11. Khazaei, M.R., Zahabiyoun, B., Saghafian, B., 2012. Assessment of climate change impact on floods using weather generator and continuous rainfall-runoff model. *International Journal of Climatology*, vol. 32(13), pp. 1997- 2006
12. Khazaei, M.R., Ahmadi, S., Saghafian, B., Zahabiyoun, B., 2013. A new daily weather generator to preserve extremes and low-frequency variability. *Climatic Change*, 119, pp. 631-645
13. Prudhomme, C., Reynard, N., Crooks, S., 2002. Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now?. *Hydrological Processes*, vol. 16, pp. 1137-1150
14. Reynard, NS., Prudhomme, C., Crooks, SM., 2001. The flood characteristics of large UK Rivers: Potential effects of changing climate and land use. *Climatic Change*, vol. 48, pp. 343-359
15. Pourtouserkani, A., Rakhshandehroo, Gh., 2014. Investigating climate change impact on extreme rainfall events, Case study: Chenar-Rahdar basin, Fars, Iran. *Scientia Iranica, A*, vol. 21, pp. 525-533
16. Liu, Z., Xu, Z., Charles, SP., Fu, G., Liu, L., 2011. Evaluation of two statistical downscaling models for daily precipitation over an arid basin University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 1-19
3. Tryhorn, L., DeGaetano, A., 2011. A comparison of techniques for downscaling extreme precipitation over the Northeastern United States. *International Journal of Climatology*, vol. 31, pp. 1975-1989.
4. Asgari, A., Rahimzade, F., Mohammadian, N., Fattah, E., 2008. Terend Analysis of Extreme Precipitation Indices Over Iran. *Iran-Water Resources Research*, vol. 3(3), pp. 42-55 (In Persian)
5. Arnbjerg-Nielsen, K., 2006. Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water Sci. Technol.* 54 (6-7), pp. 1-8.
6. Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., Pan, X., 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J. Climate*, 18, pp. 1096-1108.
7. Agilan, V., Umamahesh, N.V., 2016. Is the covariate based non-stationary rainfall IDF curve capable of encompassing future rainfall changes? *Journal of Hydrology*, 541, pp. 1441-1455.
8. Cheng, L., AghaKouchak, A., 2014. Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate. *Scientific Reports*, 4, pp. 7093 (1-6)
9. Tfwala, C.M., Rensburg, L.D., Schall, R., Mosia, S.M., Dlamini, P., 2017. Precipitation intensity-duration-frequency curves and their uncertainties for Ghaap plateau. *Climate Risk Management*, 16, pp. 1-9.

- present and future climates
Proceedings of the British
Hydrological Society. 7th National
Hydrology Symposium, University of
Newcastle upon Tyne, British
Hydrological Society
22. Cowpertwait, P.S.P., Kilsby, C.G.,
O'Connell, P.E., 2002. A space-time
Neyman-Scott model of rainfall:
Empirical analysis of extremes. *Water
Resour Res* 38(8), pp. 1131 (1-14).
23. Burton, A., Kilsby, CG., Fowler, HJ.,
Cowpertwait, PSP., O'connell, PE.,
2008. RainSim: A spatial-temporal
stochastic rainfall modelling system.
Environmental Modelling & Software,
23, pp. 1356-1369
24. Holman, I.P., Tascone, D., Hess,
T.M., 2009. A comparison of
stochastic and deterministic methods
for modelling potential groundwater
recharge under climate change in East
Anglia, UK: implications for
groundwater resource management.
Hydrogeology Journal, 17, pp.1629-
1641.
25. Reynard, N.S., Prudhomme, C.,
Crooks, S.M., 2001. The flood
characteristics of large UK Rivers:
Potential effects of changing climate
and land use. *Climatic Change*, 48, pp.
343-359.
- in China. *International Journal of
Climatology*, vol. 31, pp. 2006-2020
17. Yang, T., Li, H., Wang, W., YuXu,
H., Yu, Z., 2012. Statistical
downscaling of extreme daily
precipitation, evaporation, and
temperature and construction of future
scenarios. *Hydrological Processes*,
vol. 26, pp. 3510–3523
18. Semenov, MA., 2007. Development of
high-resolution UKCIP02-based
climate change scenarios in the UK.
Agricultural and Forest Meteorology,
vol. 144, pp. 127-138
19. Kilsby, CG., Jones, PD., Burton, A.,
Ford, AC., Fowler, HJ., Harpham, C.,
James, P., Smith, A., Wilby, RL.,
2007. A daily weather generator for
use in climate change studies.
*Environmental Modelling and
Software*, vol. 22, pp. 1705–1719
20. Fowler, HJ., Blenkinsop, S., Tebaldi,
C., 2007. Linking climate change
modelling to impacts studies: recent
advances in downscaling techniques
for hydrological modelling.
International Journal of Climatology,
vol. 27, pp. 1547-1578
21. Kilsby, CG., Burton, A., Birkinshaw,
SJ., Hashemi, AM., O'connell, PE.,
2000. Extreme rainfall and flood
frequency distribution modelling for