

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره نهم، شماره بیست و ششم، زمستان ۱۳۹۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۳

صفحات: ۱۶۰ - ۱۴۵

مقاله علمی پژوهشی

بررسی پارامترهای دما و بارندگی حوضه آبخیز هراز تحت تأثیر تغییر اقلیم

عیسی کیا^۱، ولی الله کریمی^{۲*}

۱. محقق پژوهشی، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری
۲. استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری

چکیده

به دلیل تفکیک فضایی کم و ساده‌سازی‌های مدل‌های گردش عمومی جو در مقایسه با مدل‌های منطقه‌ای و کوتاه‌مدت، خروجی این مدل‌ها نمی‌تواند تقریب درستی از شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه ارائه دهد. با توجه به وقت‌گیر بودن و عدم صرفه اقتصادی استفاده از مدل‌های دینامیکی، توجه عمومی به استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری افزایش یافته است. یکی از روش‌های مفید و معمولی در روش ریزمقیاس‌نمایی آماری، روش SDSM می‌باشد. به این منظور، ابتدا پارامترهای جوی در منطقه طی ۳۲ سال گذشته (۲۰۱۵-۱۹۸۴) با آزمون من-کندال بررسی شد. نتایج نشان داد سری زمانی داده‌های بارش و دما دارای روند معنی‌داری است. سپس با ریزمقیاس‌سازی آماری داده‌ها به کمک نرم‌افزار SDSM، پارامترهای روزانه دمای حداکثر، حداقل، متوسط و بارندگی حوضه آبریز هراز در استان مازندران، تحت سناریوهای RCP2.6 (خوش‌بینانه) و RCP8.5 (بدبینانه) و مدل اقلیمی CanESM2 از سری مدل‌های جدید CMIP5 در سه دوره بیست ساله آتی از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۹ شبیه‌سازی شد. در نهایت تحت سناریوی بحرانی تر RCP8.5 تا انتهای دوره پیش‌بینی مشخص شد که دمای حداکثر، حداقل و متوسط حوضه به ترتیب ۰/۹۱، ۱/۱۳ و ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش و بارش ۱۵/۱ درصد (۷/۴ میلی‌متر) کاهش خواهد یافت.

واژگان کلیدی: بارندگی، حوضه آبریز هراز، ریزمقیاس‌نمایی، دما، مدل SDSM.

مقدمه

تغییر اقلیم یعنی هر تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب و هوایی در یک دوره زمانی بلندمدت که در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی رخ دهد، در حالی که در وضعیت عمومی اقلیم، تغییری مشاهده نمی‌شود (سیواکومار و همکاران، ۲۰۰۵). پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم که عمدتاً ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد، اثرات منفی و مخربی را بر جوامع بشری تحمیل می‌کند. بر اساس مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای مختلف، پیش‌بینی می‌شود متوسط دمای جهان طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد که این افزایش دما همراه با تغییراتی در الگوهای زمانی و مکانی بارش خواهد بود. تغییر اقلیم می‌تواند بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آب، کشاورزی، مقوله انرژی و صنعت توریسم تأثیرگذار باشد (سیاری و همکاران، ۱۳۹۰).

برای درک ماهیت پیچیده اتمسفر و پیش‌بینی تغییرات آن در آینده باید مدلی از اقلیم با استفاده از قوانین و روابط ریاضی بین پارامترهای مختلف اتمسفر فراهم نمود. به‌علت پیچیدگی معادلات از نظر ریاضی و تعداد زیاد آنها و نیز پیچیده بودن شرایط مرزی، حل این معادلات به روش تحلیلی امکان‌پذیر نیست. بنابراین دانشمندان برای حل این معادلات به روش‌های عددی متوسل شدند. ریچاردسون در سال ۱۹۲۲ اولین مدل عددی اقلیمی را معرفی کرد. تا چندین سال این معادلات با دقت پایین و به‌صورت دستی حل می‌شدند، تا اینکه در دهه ۱۹۷۰ با ظهور رایانه‌ها تحول عظیمی در مدل کردن اقلیم به‌وجود آمد. امروزه مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCM)، معتبرترین ابزار بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف می‌باشند. این مدل‌ها سه بعدی بوده و قادرند سیستم اقلیمی را با لحاظ نمودن اکثر فرآیندها در مقیاس جهانی و یا قاره‌ای شبیه‌سازی کنند. مدل‌های GCM قابل استفاده در مطالعات کاربردی با ابعاد کوچک‌تر از خود نیستند و خروجی‌های آنها از دقت مکانی پایینی برخوردارند (قوش و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین، برای استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس مناسب و یا حتی در مقیاس ایستگاهی، ریزمقیاس‌نمایی لازم خواهد بود (مینویل و همکاران، ۲۰۰۸).

ریزمقیاس‌نمایی را می‌توان به دو روش دینامیکی و آماری انجام داد. هیدرولوژیست‌ها برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی، بیش‌تر از مدل‌های آماری استفاده می‌کنند. روش‌های آماری در مقایسه با روش‌های دینامیکی، به خصوص در مواقعی که هزینه کم‌تر و ارزیابی سریع‌تر عوامل موثر بر تغییرات آب و هوایی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است (ویلکس و ویلی، ۱۹۹۹). از جمله مدل‌هایی که در روش‌های آماری استفاده می‌شوند می‌توان به USCLIMATE WGEN، GEM، LARS-WG CLIMGEN و SDSM اشاره کرد.

با توجه به اهمیت رخداد تغییر اقلیم به‌ویژه اثرات ترکیبی افزایش دما و بالارفتن غلظت دی‌اکسید کربن جو، افزایش احتمال وقوع حوادث حدی (خشکسالی، سیلاب و یخبندان) و آثاری که می‌تواند روی منابع مختلف داشته باشد، پژوهش‌های متعددی انجام گرفته است.

میزان تغییرات اقلیم در دو جبهه شمالی و جنوبی رشته کوه البرز مرکزی مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق از ایستگاه‌های سینوپتیک دو استان تهران و مازندران استفاده شد. در نهایت با توجه به افزایش دما و کاهش بارندگی

¹ General Circulation Models

در هر دو استان، کویرزایی در آینده سرعت بیش‌تری خواهد یافت که این نرخ رشد در دامنه جنوبی البرز مرکزی بسیار چشم‌گیرتر از دامنه شمالی آن است. همچنین، احتمال افزایش بارندگی‌های سیل‌آسا و رگباری در هر دو دامنه وجود دارد که این احتمال برای بارش‌های با شدت بیش‌تر در مازندران و با دوره برگشت کوتاه‌تر در تهران، بیش‌تر است (حق‌طلب و همکاران، ۱۳۹۲).

تغییرات دو پارامتر اصلی اقلیم یعنی دما و بارندگی در استان مازندران و غرب استان گلستان با تأکید بر بخش نوار ساحلی دریای خزر و مقایسه آن‌ها با تغییرات این دو پارامتر در مقیاس نیمکره شمالی و جهانی مورد بررسی قرار گرفت. در ایستگاه رامسر و میانگین منطقه‌ای و همچنین دو ایستگاه بابلسر و گرگان، دمای متوسط افزایش و بارندگی کاهش یافته که عکس یکدیگر رخ می‌دهند. این شرایط می‌تواند تأثیری از افزایش گازهای گلخانه‌ای در سطح محلی، منطقه‌ای و جهانی و همچنین فاصله از منبع عظیم آبی دریای خزر باشد (پیرنیا و همکاران، ۱۳۹۴).

پارامترهای اقلیمی دما و بارش حوضه آبخیز کشف‌رود استان خراسان رضوی با انتخاب چهار مدل اقلیمی از بین چهارده مدل مستخرج از جدیدترین گزارش هیأت بین‌الدول بر اساس معیارهای ارزیابی، توسط چهار سناریوی جدید انتشار RCPs تحت سه بازه زمانی از سال ۲۰۰۶-۲۱۰۰ مدل‌سازی و با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تا انتهای قرن ۲۱ در مقایسه با دوره تاریخی در تمامی مناطق حوضه، به‌طور متوسط دمای حوضه بین ۰/۵۶ تا ۳/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش به‌میزان ۱۰/۷ درصد کاهش می‌یابد (آفاخانی افشار و همکاران، ۱۳۹۵).

با استفاده از داده‌های بارش روزانه ۵۲ ایستگاه سینوپتیک، اثرات بلندمدت تغییر اقلیم بر تغییرات مکانی و زمانی بارش در سطح کشور با مدل LARS-WG و استفاده از مدل گردش عمومی HADCM3 تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 طی سه دوره سی ساله تا سال ۲۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر اقلیم باعث افزایش غیریکنواختی بارش در دو مقیاس زمانی و مکانی در بخش اعظم کشور خواهد شد. همچنین، علی‌رغم افزایش میانگین بارش در تمام دوره‌های زمانی، مقدار آن در دو دوره زمانی سی ساله دوم و سوم، کم‌تر از مقدار آن در سی ساله اول بوده است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۵).

دو مدل SDSM و LARS-WG برای ریزمقیاس‌سازی و شبیه‌سازی داده‌های بارندگی با داده‌های بزرگ مقیاس HadCM3 GGCM تحت سناریوهای A2 و B2 در حوضه رودخانه‌ای در مرکز ایتالیا مقایسه شد. اگرچه دو روش ریزمقیاس‌سازی نتایج عددی یکسانی را نشان ندادند، ولی هر دو مدل تأثیر تغییر اقلیم در حوضه مطالعاتی در تمام سری‌های زمانی از دما و بارندگی را یکسان نشان دادند. در مجموع، عملکرد دو مدل با نتایج مطالعات قبلی و پروژه‌های IPCC AR4 یکسان بود (فیسسه‌ها و همکاران، ۲۰۱۲).

روند تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه رودخانه ژیانگ جیانگ در چین مورد تحلیل قرار گرفت. ابتدا تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره ۴۰ ساله پایه با روش پنمن-مانتیس فائو محاسبه شد. سپس مقدار آن در طی سه دوره ۳۰ ساله با ریزمقیاس‌سازی خروجی‌های CMIP5 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به‌کمک مدل آماری SDSM پیش‌بینی شد. نتایج حاکی از عملکرد خوب مدل SDSM در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع بود. همچنین،

افزایش برآورد مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل تحت سناریوی RCP8.5 بیش تر از مقدار افزایش آن تحت سناریوی RCP4.5 در دوره آتی بوده است (تائو و همکاران، ۲۰۱۵).

اثر پدیده تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارندگی به عنوان دو پارامتر اصلی تأثیرگذار بر سیستم منابع آبی حوضه رودخانه وامی- روو مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از مدل‌های گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و B2 استفاده شد و خروجی‌های این مدل برای دو دوره سی ساله آماری ۲۰۲۰-۲۰۸۰ با مدل آماری SDSM ریزمقیاس شد. نتایج نشان داد که میانگین بارندگی ماهانه در هر دو سناریو افزایش می‌یابد. همچنین، حداکثر دما دارای روند افزایشی به میزان ۷/۵-۰/۲ درجه سانتی‌گراد و حداقل دما دارای روند کاهشی به میزان ۱/۵-۰/۴ درجه سانتی‌گراد خواهد داشت (گولاچا و مولونگو، ۲۰۱۶).

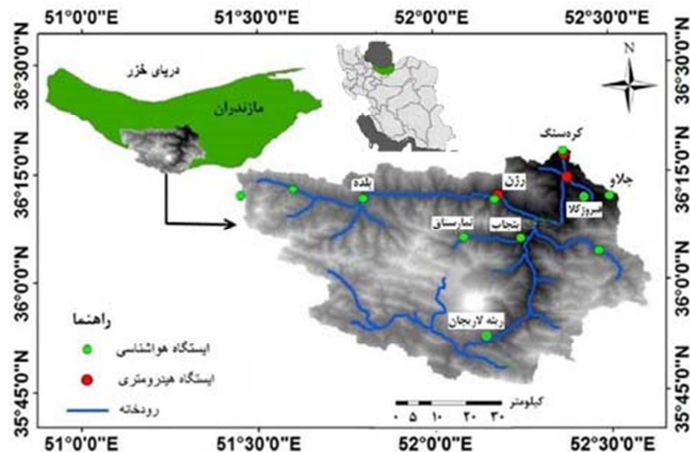
با استفاده از روش استنتاج چند مدلی بی‌زین، تغییرات هواشناسی در چهار حوضه رودخانه چین با سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش تعداد روزهای تابستان، کاهش تعداد روزهای یخبندان و افزایش تعداد روزهای با بارندگی شدید (بیش تر از ۲۰ میلی‌متر) طی سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۹۹ در کل حوضه‌ها بود (سون و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به مطالعات فوق، مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات انجام شده در ایران در حوضه مدل‌سازی تغییر اقلیم بر اساس داده‌های سری CMIP3 و CMIP4 بوده است. لذا انجام مطالعات و به‌روز رسانی آنها با داده‌های CMIP5 برای کاهش عدم قطعیت مدل‌سازی تغییر اقلیم دهه‌های آتی امری ضروری است. بنابراین، در این پژوهش، تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) حوضه آبریز هراز در دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۷۹ با استفاده از مدل CanESM2 از سری مدل‌های جدید CMIP5 تحت سناریوهای جدید RCPS مورد بررسی قرار گرفت.

داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده این پژوهش حوضه کوهستانی هراز در یال شمالی رشته کوه البرز با عرض جغرافیایی از ۳۵ درجه و ۴۶ دقیقه شمالی تا ۳۶ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی از ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه شرقی تا ۵۲ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی با متوسط ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریای آزاد و دارای وسعت ۴۰۱۴۰۹/۲ هکتار است که در جنوب استان مازندران و شهرستان آمل واقع شده است. رودخانه هراز با متوسط آبدهی ۳۱/۱۰ مترمکعب بر ثانیه، پرآب‌ترین رودخانه استان مازندران به حساب می‌آید. حداقل ارتفاع حوضه ۳۰۰ متر و حداکثر آن ۵۶۰۰ متر است. متوسط مقدار بارندگی سالانه از حداقل مقدار ۱۸۴ میلی‌متر در بخش تقریباً مرکزی تا حدود ۸۸۰ میلی‌متر در بخش شرقی حوضه در نوسان است. همچنین، متوسط دمای سالانه منطقه حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد و متوسط تبخیر سالانه منطقه حدود ۱۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز هراز را نشان می‌دهد.



شکل ۱: محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز هراز

جهت انجام تحقیق حاضر از آمار روزانه بارندگی، دمای حداکثر، حداقل و متوسط هشت ایستگاه هواشناسی حوضه مورد مطالعه طی یک دوره آماری ۳۲ ساله، از سال ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۵ استفاده شد. آمار مذکور از اداره کل هواشناسی و شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان مازندران دریافت گردید. قبل از هرگونه اقدام برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، به منظور اطمینان از کیفیت، همگنی و کامل بودن سری آماری؛ تست همگنی داده‌ها از آزمون ران تست، کفایت داده‌ها از روش ماکوس، حذف داده‌های پرت از آزمون گروپز و بک و برای رفع نواقص آماری از ضریب همبستگی بین ایستگاه‌های همجوار استفاده گردید. در جدول ۱، مساحت حوضه مورد مطالعه و نیز مشخصات و مساحت تحت پوشش ایستگاه‌های باران‌سنجی موجود در آن که از آمار روزانه برخوردار بودند، جهت استخراج میانگین بارش حوضه به روش چند ضلعی‌های تیسن با استفاده از نرم‌افزار اتوکد ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی واقع در محدوده مورد مطالعه

سطح تحت پوشش (km ²)	ارتفاع (m)	مختصات جغرافیایی		نوع ایستگاه	ایستگاه	سطح حوضه (km ²)	نام حوضه
		عرض	طول				
۷۲/۹	۳۱۴	۳۶° ۱۹'	۵۲° ۲۲'	کلیماتولوژی	کره‌سنگ	۴۰۱۴/۱	هراز
۱۱۸/۲	۱۵۰۱	۳۶° ۱۱'	۵۲° ۳۰'	تبخیرسنجی	تیارگت چلاو		
۴۴۲/۲	۹۳۳	۳۶° ۱۲'	۵۲° ۲۷'	باران‌سنجی	فیروزکلا		
۲۹۰/۴	۱۰۵۵	۳۶° ۰۶'	۵۲° ۱۵'	باران‌سنجی	پنجاب		
۲۹۵/۱	۱۳۰۹	۳۶° ۱۲'	۵۲° ۱۱'	باران‌سنجی	رزن		
۳۰۸/۲	۲۱۵۶	۳۶° ۰۶'	۵۲° ۰۴'	باران‌سنجی	نمارستاق		
۱۳۰۸/۹	۲۰۴۲	۳۶° ۱۲'	۵۱° ۴۸'	کلیماتولوژی	بلده		
۱۱۷۸/۳	۲۰۵۸	۳۵° ۵۲'	۵۲° ۰۹'	کلیماتولوژی	رینه لاریجان		

مدل گردش عمومی جو سری CMIP5^۱

در سال ۲۰۰۸ برنامه مطالعات اقلیمی سازمان جهانی هواشناسی کارگروه هماهنگ کننده مدل‌های جفت شده اقلیمی با عضویت مراکز بین‌المللی فعال در زمینه مدل‌سازی اقلیمی را با هدف ایجاد مجموعه‌ای از مدل‌های اقلیمی برای شناخت مکانیسم‌های موثر در شبیه‌سازی ضعیف بازخوردهای بین چرخه کربن و ابرناکی، آزمایش پیش‌بینی‌پذیری اقلیمی و شناسایی توانایی مدل‌ها در پیش‌بینی اقلیم در مقیاس زمانی دهه و از همه مهم‌تر این که چرا مدل‌های با ساختار فیزیکی، دینامیکی، عددی و شرایط اولیه یکسان دامنه مختلفی از پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌دهند، ایجاد کرد. در سال ۲۰۱۱ اولین خروجی مدل‌های سری CMIP5 در دسترس کارگروه مذکور برای انجام مطالعات برای نیل به سه هدف فوق در دسترس قرار گرفت. در نهایت، گزارش پنجم هیات بین‌الدول تغییر اقلیم بر اساس داده‌های مجموعه مدل‌های سری CMIP5 منتشر شد که شامل ۴۰ مدل اقلیمی از جمله مدل‌های CanESM2 می‌باشد. قدرت تفکیک مکانی داده‌های سری CMIP5 نسبت به سری‌های قبل خود افزایش یافته و از حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه به حدود ۰/۵ در ۰/۵ درجه ارتقاء یافته است (سون و همکاران، ۲۰۱۷).

سناریوهای انتشار سری جدید RCPs^۲

سناریوهای RCPs در سال ۲۰۱۰ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین دول تغییرات اقلیمی با هدف مهیا نمودن مجموعه‌ای از اطلاعاتی که از نتایج آن بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی نموده و آنها را در مدل‌های اقلیمی اعمال کرد، به‌وجود آمدند. مدل‌های اقلیمی از نتایج این سناریوها برای نشان دادن غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌کنند. سناریوی خانواده RCP شامل چهار سناریوی مختلف است که این سناریوها عبارتند از: ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ که بر اساس نتایج حاصل از برخی پارامترهای اجتماعی-اقتصادی، تکنولوژیکی و میزان غلظت برخی گازها برای دهه‌های آینده طراحی شده‌اند (ون وورن و همکاران، ۲۰۱۱).

در جدول ۲، خصوصیات چهار سناریوی خانواده RCPs ارائه شده است. در این پژوهش برای ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده حوضه آبریز هراز، از سناریوهای RCP2.6 (خوش بینانه) و RCP8.5 (بدبینانه) استفاده شد.

جدول ۲: مشخصات سناریوهای سری جدید RCPs (ون وورن و همکاران، ۲۰۱۱)

سناریو	مشخصه
RCP 8.5	میزان غلظت CO ₂ تا سال ۲۱۰۰ برابر PPM ۱۳۷۰، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی تا ۸/۵ وات بر مترمربع
RCP 6	میزان غلظت CO ₂ تا سال ۲۱۰۰ برابر PPM ۸۵۰، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی، تا ۶ وات بر مترمربع
RCP 4.5	میزان غلظت CO ₂ تا سال ۲۱۰۰ برابر PPM ۶۵۰، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی ۴/۵ وات بر مترمربع
RCP 2.6	میزان غلظت CO ₂ تا سال ۲۱۰۰ برابر PPM ۴۹۰، اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشتهای تابشی تا ۲/۶ وات بر مترمربع

^۱ داده‌ها از این سایت دریافت شد. climate-scenarios.canada.ca

^۲ داده‌ها از این سایت دریافت شد. climate-scenarios.canada.ca

مدل ریزمقیاس نمایی آماری^۱ (SDSM)

مدل SDSM یک مدل ریزمقیاس کننده آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم‌هزینه داده‌های ریزمقیاس شده در مقیاس ایستگاهی به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه را دارا می‌باشد. اولین نسخه این مدل در سال ۲۰۰۱ با عنوان SDSM 2.2 توسط ویلی اراشه شد و از آن زمان تاکنون چندین بار تحت بازنگری و اصلاح قرار گرفت. این مدل روابط آماری بین رفتارهای بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده‌ها) و محلی یا دیدبانی (پیش‌بینی شونده‌ها) را بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کند. این روابط با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه و خروجی مدل‌های گردش عمومی در دوره مشابه دیدبانی ایجاد می‌شوند. فرض بر این است که این روابط در آینده نیز صادق باشند. ورودی این مدل، داده‌های دیدبانی روزانه ایستگاه، متغیرهای بزرگ مقیاس در دوره مشابه دیدبانی و برون‌داد متغیرهای بزرگ مقیاس مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار گوناگون برای دوره مطالعاتی آینده می‌باشد (نشاط و سجادی بمی، ۱۳۹۵). استفاده از SDSM شامل شش مرحله کنترل کیفیت و تبدیل داده‌ها، انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده غالب، واسنجی مدل، تولید داده‌های تاریخی و صحت‌سنجی مدل، آنالیز داده‌ها و تولید سناریوهای اقلیمی آینده می‌باشد.

آشکارسازی رخداد تغییر اقلیم در منطقه

پارامترهای اقلیمی در مقیاس زمان و مکان به دلایل زیادی تغییر می‌کنند که باید نحوه تغییرات آن‌ها براساس مشاهدات و با بهره‌گیری از روش‌های آماری تعیین شود. در این پژوهش، به منظور تعیین نرمال بودن توزیع داده‌های مشاهداتی متوسط دما از آزمون ناپارامتری کولموگروف-اسمیرنوف (K-S) و برای بررسی روند تغییرات زمانی پارامترهای دمایی و بارندگی در مقیاس زمانی فصلی و سالانه و آشکارسازی رخداد تغییر اقلیم در محدوده مطالعاتی، از آزمون من-کندال استفاده شد که یکی از رایج‌ترین آزمون‌های ناپارامتری تحلیل سری‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌شمار می‌رود. چنانچه شاخص آماری آزمون من-کندال (Z) بزرگ‌تر از $+1/96$ و یا کوچک‌تر از $-1/96$ باشد، داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد و چنانچه بزرگ‌تر از $+2/58$ یا کوچک‌تر از $-2/58$ باشد، داده‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای روند می‌باشند. در غیراین صورت، داده‌ها تصادفی و بدون روند است (خادمی، ۱۳۹۶). در این پژوهش، به منظور آشکارسازی رخداد تغییر اقلیم در محدوده مطالعاتی از داده‌های مشاهداتی دمای حداکثر، دمای حداقل، دمای متوسط و بارندگی حوضه آبریز هراز به مدت ۳۲ سال (۲۰۱۵-۱۹۸۴ میلادی) استفاده شد.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی قابلیت مدل و مقایسه داده‌های دما و بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی دوره پایه از معیارهای آماری زیر استفاده شد (روابط ۱ الی ۴).

¹ Statistical Downscaling Model

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right|}{N} \times 100 \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

که در این روابط، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، EF کارآیی مدل، VE خطای حجمی (%)، R^2 ضریب تبیین، P_i مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، O_i مقادیر مشاهداتی (واقعی)، N تعداد داده‌ها، \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشد. بنابراین، هر مدلی که از مقدار RMSE و VE کمتر و از EF دامنه تغییرات منفی بی‌نهایت تا یک) و R^2 نزدیک‌تر به یک برخوردار باشد، آن مدل نسبت به سایر مدل‌ها دقت بالاتری خواهد داشت (کیسی، ۲۰۱۰).

در ادامه، با معرفی این داده‌ها به مدل SDSM، پارامترهای روزانه دمای حداقل، حداکثر، متوسط و بارش تحت دو سناریوی RCP2.6 به‌عنوان سناریوی خوش‌بینانه و RCP8.5 به‌عنوان سناریوی بدبینانه در سه دوره ۲۰ ساله ۲۰۳۹-۲۰۲۰، ۲۰۵۹-۲۰۴۰ و ۲۰۷۹-۲۰۶۰ برای منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی گردید و تغییرات هر پارامتر در سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

آشکارسازی رخداد تغییر اقلیم در منطقه

جدول ۳، نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای پارامترهای دما و بارندگی متوسط سالانه (۲۰۱۵-۱۹۸۴) در حوضه مطالعاتی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج آزمون، داده‌های هر چهار پارامتر دمای حداکثر، دمای حداقل، دمای متوسط و بارندگی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار نبوده و یا به عبارت دیگر، داده‌ها نرمال می‌باشند.

جدول ۳: نتایج آزمون K-S برای پارامترهای دما و بارندگی متوسط سالانه در منطقه مورد مطالعه

آماره	دمای حداکثر	دمای حداقل	دمای متوسط	بارش
Z	۰/۳۹۶	۰/۹۸۱	۰/۵۸۲	۰/۷۰۳
P (معنی‌داری)	۰/۹۹۸	۰/۲۹۱	۰/۸۸۸	۰/۷۰۶

نتایج حاصل از آزمون من- کندال برای پارامترهای دما و بارندگی حوضه آبریز هراز در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق جدول، مقدار شاخص Z برای سه پارامتر دمایی در مقیاس زمانی فصلی و سالانه بزرگتر از $1/96+$ به دست آمد که نشان دهنده روند افزایشی آنها می‌باشد. به طوری که دمای حداکثر در تابستان و دمای متوسط در بهار در سطح اطمینان ۹۹ درصد و در بقیه زمان‌ها در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشند. همچنین، دمای حداقل در زمستان در سطح اطمینان ۹۵ درصد و در بقیه زمان‌ها در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار شد. اما پارامتر بارندگی در بهار، پاییز و بارندگی سالانه در سطح اطمینان ۹۵ درصد، روند معنی‌دار و کاهشی نشان داد. بنابراین تغییرات داده‌های دما و بارندگی منطقه در دوره‌های گذشته تصادفی نبوده و تحت تأثیر عواملی روند معنی‌دار از خود نشان داده‌اند.

جدول ۴: آماره‌های حاصل از آزمون من- کندال برای پارامترهای دما و بارندگی در منطقه مورد مطالعه

پارامتر	زمان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	سالانه
دمای حداکثر		$1/98^*$	$3/03^{**}$	$2/04^*$	$2/56^*$	$2/16^*$
دمای متوسط		$3/63^{**}$	$3/24^*$	$2/86^*$	$2/42^*$	$2/37^*$
دمای حداقل		$4/17^{**}$	$3/60^{**}$	$2/72^{**}$	$2/34^*$	$3/52^{**}$
بارندگی		$-2/15^*$	$-0/05$	$-1/98^*$	$-0/73$	$-2/10^*$

* در سطح ۹۵ درصد ** در سطح ۹۹ درصد

وضعیت آبی دما و بارش در حوضه هراز

با توجه به ضرایب همبستگی و P-value بین پیش‌بینی‌کننده‌ها و پیش‌بینی شونده‌ها در دوره پایه، موثرترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس CanESM2 برای سه پارامتر دمایی و بارش انتخاب گردید. بر طبق نتایج، داده‌های درجه حرارت همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با داده‌های بارندگی داشتند. این بدان علت است که دما یک متغیر پیوسته بوده و نسبت به بارندگی تغییرپذیری کمتری دارد. اما بارندگی یک کمیت گسسته است و مقدار آن در یک حوضه تحت تأثیر عوامل مختلفی می‌باشد.

فرآیند تولید داده در مدل SDSM شامل سه بخش واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی می‌باشد. برای انجام دو مرحله اول، از داده‌های دوره آماری ۱۹۹۹-۱۹۸۶ به مدت ۱۴ سال برای مرحله واسنجی مدل و از داده‌های آماری ۲۰۰۵-۲۰۰۰ به مدت ۶ سال برای تولید داده‌های تاریخی مرحله صحت‌سنجی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان داد که در تمام ماه‌ها در سطح احتمال ۵ درصد مقادیر میانگین دما و بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی دوره پایه، معنی‌دار نشده و یا به عبارت دیگر، داده‌ها نرمال می‌باشند. بنابراین با به‌کارگیری آزمون‌های پارامتریک نظیر t مستقل برای مقایسه میانگین‌ها مشخص شد که غیر از دمای متوسط در مرحله صحت‌سنجی در ماه آگوست، در سایر پارامترها در کل ماه‌ها در سطح احتمال ۵ درصد، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر میانگین ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی توسط مدل SDSM در دوره پایه وجود نداشت (از ذکر جداول مربوطه خودداری شد).

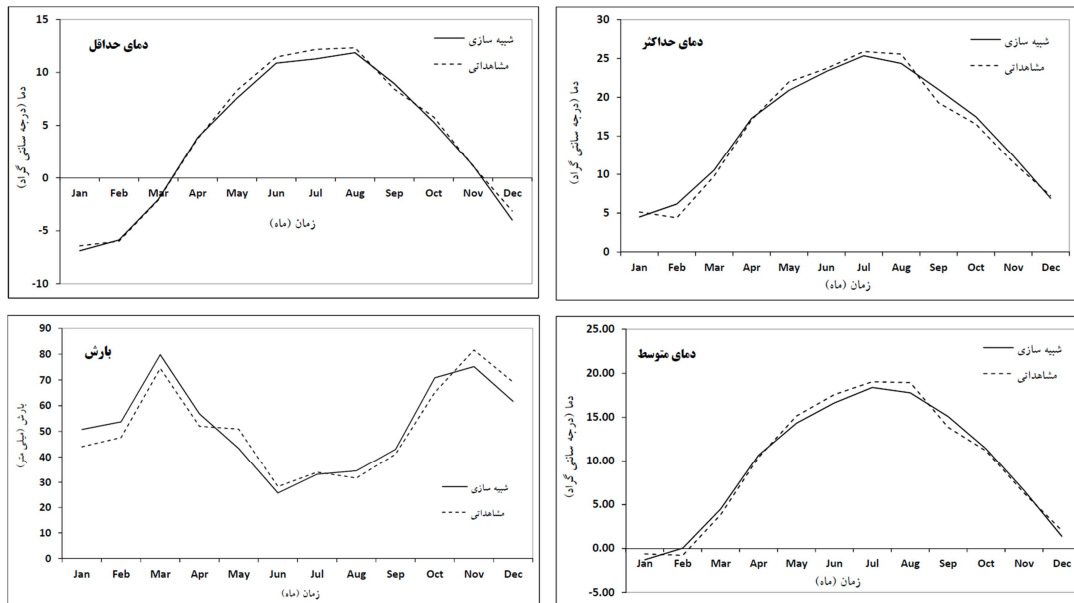
همچنین، نتایج حاصل از معیارهای آماری داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دما و بارش در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی دوره پایه در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵: معیارهای آماری ارزیابی مدل SDSM در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶)

مرحله صحت‌سنجی				مرحله واسنجی				شاخص آماری
EF	R ²	VE	RMSE	EF	R ²	VE	RMSE	
۰/۹۹۴	۰/۹۸۸	۵/۰۸	۰/۶۳	۱/۰۰	۰/۹۹۰	۱/۸۳	۰/۱۲	دمای حداقل
۰/۹۹۳	۰/۹۸۱	۴/۴۷	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹۲	۰/۰۸	۰/۰۱	دمای حداکثر
۰/۹۹۱	۰/۹۸۴	۴/۸۶	۰/۷۷	۱/۰۰	۰/۹۹۳	۰/۷۴	۰/۰۳	دمای متوسط
۰/۹۹۰	۰/۹۹۵	۷/۳۳	۵/۳۲	۰/۹۹۶	۰/۹۹۸	۴/۶۹	۳/۱۸	بارش

با توجه به جدول ۵، مقادیر کارایی مدل در هر چهار پارامتر در دو مرحله، نزدیک به عدد یک می‌باشد که نشان می‌دهد بین مقادیر میانگین دما و بارش ماهانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی برقرار می‌باشد، لذا مدل از عملکرد مناسبی برخوردار است. با توجه به معیارهای آماری محاسبه شده، ضرایب همبستگی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده و نشان از قابلیت مدل در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی می‌دهد. از نظر کلیه معیارهای آماری، دقت مدل برای پیش‌بینی دمای حداقل بیش‌تر از سایر متغیرها و دقت پیش‌بینی بارش کم‌تر از بقیه بود. داده‌های بارش پراکندگی بیش‌تری نسبت به داده‌های دما دارند، اما داده‌های دما از تغییرات کم‌تر و نظم بیش‌تری برخوردارند. در شکل ۲، مقایسه مقادیر میانگین دما و بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی در مرحله صحت‌سنجی مدل نمایش داده شد.

در شکل ۲ به‌طور وضوح مشخص است که میانگین ماهانه داده‌های شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش تطابق خوبی با میانگین ماهانه داده‌های مشاهداتی در مرحله صحت‌سنجی مدل دارند. هرچند در برخی از ماه‌ها اختلاف بین میانگین‌ها مشاهده می‌شود، اما با توجه به آزمون t مستقل، به‌غیر از دمای متوسط در ماه آگوست، در بقیه موارد این اختلاف‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشند.

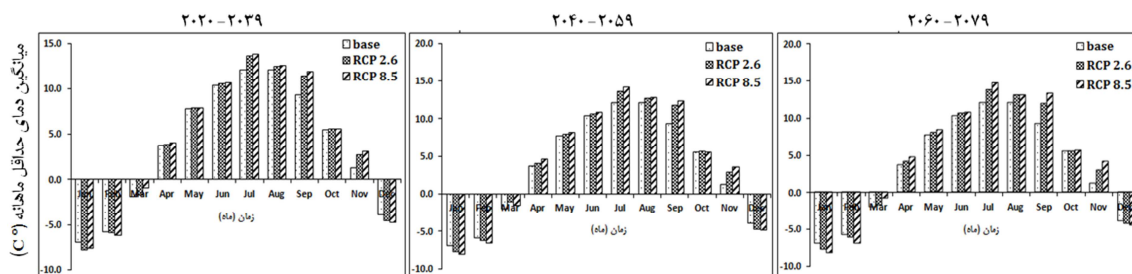


شکل ۴: مقایسه مقادیر دما و بارش ماهانه داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مرحله اعتبارسنجی مدل

به‌طور کلی، مطلوب بودن مقادیر معیارهای ارزیابی مدل و عدم اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی، موید کارایی مناسب مدل SDSM برای شبیه‌سازی وضعیت اقلیمی آینده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

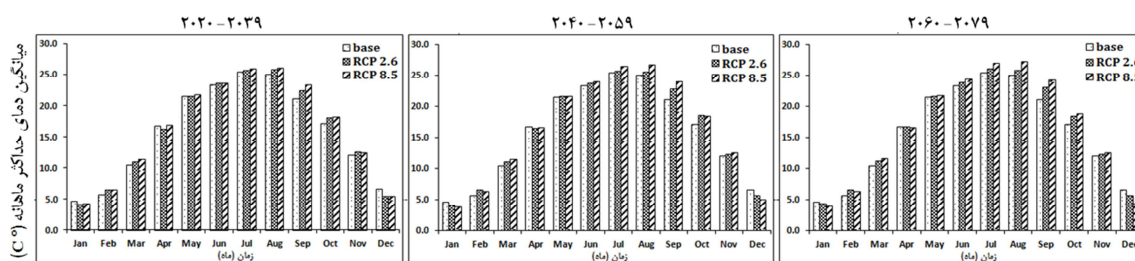
پس از مدل‌سازی، پارامترهای روزانه دمای حداقل، حداکثر، متوسط و بارش تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در سه دوره ۲۰ ساله ۲۰۳۹-۲۰۲۰، ۲۰۵۹-۲۰۴۰ و ۲۰۷۹-۲۰۶۰ برای منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی گردید.

شکل ۳، مقادیر متوسط حداقل دمای ماهانه پیش‌بینی شده سه دوره آینده را برای دو سناریو در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد. تحت هر دو سناریو، دمای حداقل ماهانه در هر سه دوره نسبت به دوره پایه در ماه‌های ژانویه، فوریه و دسامبر کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش یافت. میزان کاهش دمای حداقل در دو ماه ژانویه و فوریه بیش‌تر از ماه دسامبر بود. تنها در دوره پایانی (۲۰۶۰-۲۰۷۹) و تحت سناریوی RCP8.5، کاهش دمای حداقل در ماه فوریه بیش‌تر از دسامبر بوده است. همچنین، میزان افزایش دمای حداقل در ماه‌های جولای، سپتامبر و نوامبر در دو دوره ابتدایی و میانی بیش‌تر از سایر ماه‌ها بود که در دوره انتهایی نیز به آنها اضافه می‌شود. بنابراین، در آینده از نظر دمای حداقل، ماه‌های گرم سال به‌خصوص فصل تابستان، گرم‌تر و اواخر پاییز و اوایل زمستان سردتر خواهند شد. مقایسه دو سناریو نشان می‌دهد که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان کاهش و افزایش دمای حداقل به‌ترتیب در سناریوی RCP2.6 در دوره ابتدایی و RCP8.5 در دوره پایانی رخ داده است. در نهایت، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار افزایش میانگین دمای حداقل ماهانه برابر ۰/۰۴ و ۴/۱ درجه سانتی‌گراد بود که به‌ترتیب در سناریوهای RCP2.6 در ماه اکتبر از دوره ابتدایی و RCP8.5 در ماه سپتامبر از دوره انتهایی مشاهده شد.



شکل ۳: مقایسه سری زمانی دمای حداقل ماهانه در دوره آینده

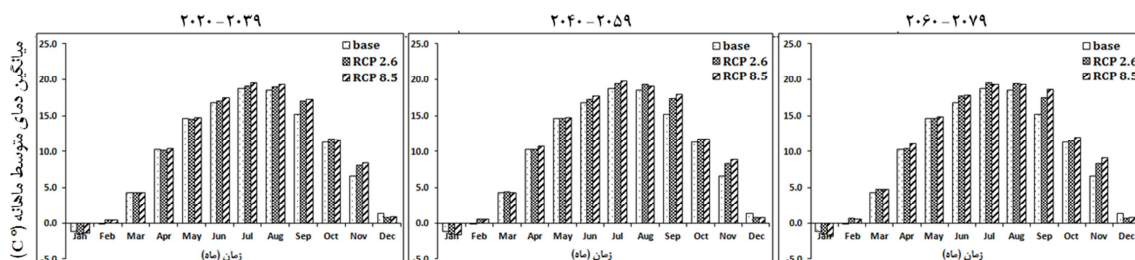
شکل ۴، میانگین حداکثر دمای ماهانه پیش‌بینی شده سه دوره آینده را در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد. به طور کلی تحت هر دو سناریو، به استثنای برخی ماه‌ها، میانگین دمای حداکثر ماهانه روند افزایشی داشت. بیشترین میزان افزایش و کاهش دمای حداکثر در هر سه دوره آتی مربوط به سناریوی RCP8.5 بود. میانگین دمای حداکثر در ماه‌های ژانویه، دسامبر و به‌طور جزئی در آوریل، کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش یافت. میزان کاهش دمای حداکثر در ماه دسامبر بیش‌تر از دو ماه دیگر بود، به‌طوری که بیش‌ترین مقدار آن تحت سناریوی RCP8.5 و در دوره پایانی اتفاق افتاد. میزان افزایش دمای حداکثر از ماه‌های ژوئن تا اکتبر بیش‌تر از سایر ماه‌ها بود، به‌طوری که مقدار آن از دوره ابتدایی به انتهای افزایش یافت. در نتیجه، در آینده به دمای حداکثر ماه‌های گرم سال به‌خصوص فصل تابستان افزوده خواهد شد، اما آخر پاییز و اول زمستان مقدار آن کاهش خواهد یافت. مقایسه دو سناریو نشان می‌دهد که کم‌ترین مقدار افزایش دمای حداکثر در ماه می و برابر $0/03$ درجه سانتی‌گراد بود که تحت سناریوی RCP2.6 در دوره ابتدایی مشاهده شد. بیش‌ترین میزان افزایش دمای حداکثر در ماه سپتامبر و برابر $3/2$ درجه سانتی‌گراد بود که در دوره انتهای و تحت سناریوی RCP8.5 به‌وقوع پیوست.



شکل ۴: مقایسه سری زمانی دمای حداکثر ماهانه در دوره آینده

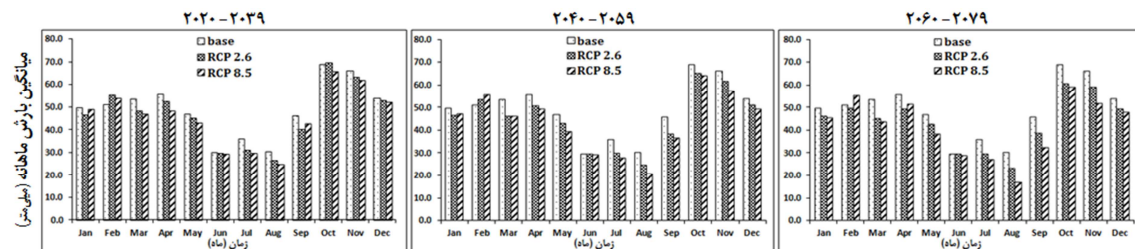
شکل ۵، میانگین دمای متوسط ماهانه پیش‌بینی شده را در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد. به استثنای دو ماه ژانویه و دسامبر، میانگین دمای متوسط ماهانه به‌طور عموم روند افزایشی داشت. بیش‌ترین میزان افزایش و کاهش دمای متوسط تحت سناریوی RCP8.5 اتفاق افتاد. میانگین دمای متوسط در ماه‌های ژانویه و دسامبر، کاهش و در سایر ماه‌ها افزایش یافت. میزان کاهش دمای متوسط در ماه دسامبر در کل دوره‌ها و سناریوها بیش‌تر از ژانویه بود، به‌طوری که بیش‌ترین مقدار آن تحت سناریوی RCP8.5 و در دوره پایانی رخ داد. میزان افزایش دمای متوسط از

ماههای ژوئن تا نوامبر بیش‌تر از سایر ماه‌ها بود، به‌طوری که مقدار آن از دوره ابتدایی به انتهای روند افزایشی داشت. همچنین، بیش‌ترین افزایش دمای متوسط به‌ترتیب در ماه‌های سپتامبر و نوامبر به‌وقوع پیوست. بنابراین، در آینده به دمای متوسط ماه‌های گرم سال به‌خصوص انتهای فصل تابستان افزوده خواهد شد، اما آخر پاییز و اول زمستان کاهش می‌یابد. با مقایسه دو سناریو، کم‌ترین مقدار افزایش دمای متوسط در ماه مارس و برابر ۰/۰۱ درجه سانتی‌گراد بود که تحت سناریوی RCP2.6 در دوره ابتدایی مشاهده شد. همچنین، بیش‌ترین میزان افزایش دمای متوسط در ماه سپتامبر و برابر ۳/۴ درجه سانتی‌گراد بود که در دوره انتهای و تحت سناریوی RCP8.5 به وقوع پیوست.



شکل ۵: مقایسه سری زمانی دمای متوسط ماهانه در دوره آینده

شکل ۶، مقادیر میانگین بارش ماهانه در منطقه مورد مطالعه را برای سه دوره آینده نشان می‌دهد. تحت هر دو سناریو، میانگین بارش ماهانه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه به‌غیر از ماه فوریه، روند کاهشی داشت. میزان کاهش میانگین بارش در اکثر ماه‌ها تحت سناریوی RCP8.5 بیش‌تر از سناریوی RCP2.6 بود. کم‌ترین مقدار کاهش میانگین بارش برابر ۰/۱ میلی‌متر در ماه ژوئن تحت سناریوی RCP2.6 در دوره ابتدایی و بیش‌ترین مقدار آن برابر ۱۴/۶ میلی‌متر در ماه نوامبر و تحت سناریوی RCP8.5 در دوره انتهای مشاهده شد. به‌طور کلی، میزان کاهش بارش در ماه‌های مارس، آوریل، می، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر روند کاهشی بیش‌تری داشته است. این امر نشان می‌دهد که در دوره‌های آتی، علاوه بر کاهش بارندگی در فصول پرباران، از مقدار آن در فصل خشک نیز کاسته شده و فصول خشک، خشک‌تر خواهند شد.



شکل ۶: مقایسه سری زمانی بارش ماهانه در دوره آینده

در جدول ۶، نتایج حاصل از میانگین ماهانه برآوردهای چهار پارامتر دما و بارش طی سه دوره آبی تحت دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه به همراه میانگین آن‌ها در دوره پایه و کل دوره آینده آمده است.

جدول ۶: نتایج حاصل از مدل SDSM تحت سناریوهای مختلف در دوره آینده

پارامتر	دمای حداکثر ماهانه		دمای حداقل ماهانه		دمای متوسط ماهانه		بارش ماهانه
	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	
میانگین دوره پایه	۱۵/۸۵	۱۵/۸۵	۳/۶۱	۳/۶۱	۹/۷۳	۹/۷۳	۴۹/۰۲
۲۰۲۰-۲۰۳۹	۱۶/۴۴	۱۶/۱۹	۴/۱۰	۴/۲۷	۱۰/۱۳	۱۰/۳۶	۴۵/۶۴
۲۰۴۰-۲۰۵۹	۱۶/۶۱	۱۶/۳۰	۴/۲۲	۴/۴۱	۱۰/۳۱	۱۰/۵۰	۴۳/۷۰
۲۰۶۰-۲۰۷۹	۱۶/۷۶	۱۶/۹۲	۴/۳۴	۴/۷۴	۱۰/۴۰	۱۰/۶۹	۴۳/۶۸
میانگین دوره آینده	۱۶/۶۰	۱۶/۴۷	۴/۲۲	۴/۴۷	۱۰/۲۸	۱۰/۵۲	۴۳/۶۵

نتایج جدول ۶، حاکی از افزایش میانگین دمای ماهانه در سطح حوضه است. این افزایش برای پارامترهای دمای حداکثر، حداقل و متوسط به ترتیب ۰/۶۲، ۰/۶۱ و ۰/۵۵ درجه سانتی‌گراد برای سناریوی RCP2.6 و ۰/۷۵، ۰/۸۶ و ۰/۷۹ درجه سانتی‌گراد برای سناریوی RCP8.5 به‌طور متوسط در دوره‌های آبی است. ضمن این که روند تغییرات هر سه پارامتر دمایی تحت هر دو سناریو از دوره ابتدایی به انتهای نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که با نتایج تحقیقات خلیلی اقدم و همکاران (۱۳۹۱)، گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) و الو و همکاران (۱۹۹۸) مطابقت دارد. محدوده تغییرات افزایش دما طی سه دوره آبی در سناریوی RCP2.6 برای دمای حداکثر، حداقل و دمای متوسط به ترتیب برابر ۰/۳۴-۰/۵۷، ۰/۷۳-۰/۴۹ و ۰/۶۷-۰/۴۰ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب برابر ۰/۹۱-۰/۵۹، ۱/۱۳-۰/۶۶ و ۰/۹۶-۰/۶۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. کمترین تغییرات دمایی تحت سناریوی RCP2.6 در دوره ابتدایی و بیش‌ترین تغییرات دمایی تحت سناریوی RCP8.5 در دوره انتهای رخ می‌دهد.

در مورد پارامتر میانگین بارش ماهانه حوضه، ملاحظه می‌شود که تحت هر دو سناریو، روند کاهش طی دوره ابتدایی تا انتهای وجود دارد که با نتایج صبوحی و سلطانی (۱۳۸۸) و گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. میانگین کاهش بارش در دوره‌های آبی برابر ۳/۸ میلی‌متر (۷/۸۳ درصد) برای سناریوی RCP2.6 و ۵/۴ میلی‌متر (۱۰/۹۵ درصد) برای سناریوی RCP8.5 می‌باشد. محدوده تغییرات کاهش بارش طی سه دوره آبی در سناریوی RCP2.6 برابر ۲/۳-۵/۴ میلی‌متر (۱۰/۹-۴/۶ درصد) و برای سناریوی RCP8.5 برابر ۳/۴-۷/۴ میلی‌متر (۱۵/۱-۶/۹ درصد) خواهد بود.

در نهایت، تحت سناریوی RCP8.5 تا انتهای دوره پیش‌بینی (۲۰۷۹ میلادی)، دمای ماهانه حداکثر، حداقل و متوسط حوضه به ترتیب ۰/۹۱، ۱/۱۳ و ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش و بارش ماهانه ۷/۴ میلی‌متر (۱۵/۱ درصد) کاهش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات داده‌های دما و بارندگی منطقه در دوره مورد مطالعه گذشته، تصادفی نبوده و تحت تأثیر عواملی، روند معنی‌دار از خود نشان دادند. داده‌های دما همبستگی بهتری با داده‌های مشاهداتی در مقایسه با داده‌های بارش دوره پایه داشتند. این بدان علت است که دما یک متغیر پیوسته بوده و نسبت به بارندگی تغییرپذیری کم‌تری دارد. اما بارندگی یک کمیت گسسته است و مقدار آن در یک حوضه تحت تأثیر عوامل مختلفی می‌باشد. تغییرات دما و بارندگی در ماه‌های مختلف سال در هر دو سناریو در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار بود. سناریوی RCP8.5 میزان افزایش دما و کاهش بارش را بیش‌تر از سناریوی RCP2.6 نشان داد که دلیل آن انتشار گازهای گلخانه‌ای بیشتر تحت این سناریو است. در نهایت، تحت سناریوی بحرانی‌تر یعنی RCP8.5، تا انتهای دوره پیش‌بینی (۲۰۷۹ میلادی)، دمای حداکثر، حداقل و متوسط حوضه به ترتیب ۰/۹۱، ۱/۱۳ و ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش و بارش ۷/۴ میلی‌متر (۱۵/۱ درصد) کاهش خواهد یافت. در آینده به دمای متوسط ماه‌های گرم سال به‌خصوص انتهای فصل تابستان افزوده خواهد شد، اما آخر پاییز و اول زمستان کاهش می‌یابد و برای بارندگی نیز علاوه بر کاهش مقدار آن در فصول پر باران، از میزان آن در فصل خشک کاسته شده و فصول خشک، خشک‌تر خواهند شد که لازم است تا برنامه‌ریزان و مدیران ارشد کشور خصوصاً در بخش‌های تأمین آب و کشاورزی آن را مد نظر قرار داده و تأثیر تغییرات این پارامترهای جوی را بر طراحی و ساخت پروژه‌ها، لحاظ نمایند. به‌طور کلی، مطلوب بودن مقادیر معیارهای ارزیابی مدل و عدم اختلاف معنی‌داری بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی، موید کارایی مناسب مدل SDSM برای شبیه‌سازی وضعیت اقلیمی آینده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

منابع

- آقاخانی افشار امیرحسین، حسن‌زاده یوسف، بسالت‌پور علی‌اصغر، پوررضا بیلندی محسن (۱۳۹۵)، ارزیابی سالیانه مولفه‌های اقلیمی حوضه آبخیز کشف‌رود در دوره‌های آتی با استفاده از گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۶، صص ۲۳۳-۲۱۷.
- پیرنیا عبدالله، حبیب‌نژاد روشن محمود، سلیمانی کریم (۱۳۹۴)، بررسی تغییرات دما و بارندگی در سواحل جنوبی دریای خزر و مقایسه آن با تغییرات در مقیاس جهانی و نیم‌کره شمالی، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، جلد ۶، شماره ۱۱، صص ۱۰۰-۹۰.
- حق‌طلب نفیسه، گودرزی محسن، حبیبی نوخندان مجید، یآوری احمدرضا، جعفری حمیدرضا (۱۳۹۲)، مدل‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG و مقایسه تغییرات آن در جبهه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، جلد ۱۵، شماره ۱، صص ۴۹-۳۷.
- خادمی معصومه (۱۳۹۶)، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر بهره‌برداری بهینه از مخزن در شرایط سیلابی براساس الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت (مطالعه موردی: سد مخزنی البرز)، رساله دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۹۳ صفحه.
- خلیلی اقدم نبی، مساعدی ابوالفضل، سلطانی افشین، کامکار بهنام (۱۳۹۱)، ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش‌بینی برخی از پارامترهای جوی سنندج، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دوره ۱۹، شماره ۴، صص ۱۰۲-۸۵.

- سیاری نسرین، علیزاده امین، بنایان اول محمد، فریدحسینی علیرضا، حسامی کرمانی مسعودرضا (۱۳۹۰)، مقایسه دو مدل گردش عمومی جو (CGSM2, HadCM3) در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی و نیاز آبی گیاهان تحت تغییر اقلیم، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۴، صص ۹۲۵-۹۱۲.
- صیوحی راضیه، سلطانی سعید (۱۳۸۷)، تحلیل روند عوامل اقلیمی در شهرهای بزرگ ایران، مجله علوم، فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۲، شماره ۴۶، صص ۳۲۱-۳۰۳.
- گودرزی مسعود، صلاحی برومند، حسینی سید اسعد (۱۳۹۴)، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه)، اکوهیدرولوژی، دوره ۲، شماره ۲، صص ۱۸۹-۱۷۵.
- موسوی سیدسعید، کاراندیش فاطمه، طبری حسین (۱۳۹۵)، تغییرات زمانی و مکانی بارش در ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم تا سال ۲۱۰۰، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال هفتم، شماره ۲۵، صص ۱۶۵-۱۵۲.
- نشاط علی، سجادی بمی یاسمین (۱۳۹۵)، پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر فراسنج دما با استفاده از نرم‌افزار گردش عمومی جو HadCM3 (مطالعه موردی: کرمان و بم)، مجله مهندسی منابع آب، سال نهم، شماره ۳۰، صص ۶۲-۵۱.
- Elo, A.R., Huttula, T., Peltonen, A., Virta, J., (1998), The effects of climate change on the temperature conditions of lakes, Boreal environment research, Vol. 3, PP. 137-150.
- Fiseha, B.M., Melesse, A.M., Romano, E., Volpi, E., Fiori, A., (2012), Statistical downscaling of precipitation and temperature for the Upper Tiber Basin in Central Italy, International Journal of Water Sciences, Vol. 1, No. 3, PP. 1-10.
- Ghosh, S., Raje, D., Mujumdar, P.P., (2010), Mahanadi streamflow: Climate change impact assessment and adaptive strategies, Current Science, Vol. 98, NO. 8, PP. 1084-1091.
- Gulacha, M.M., Mulungu, M.M., (2016), Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu river basin Tanzania, Physics, and Chemistry of the Earth, Vol. 100, PP. 62-72.
- Kisi, O., (2010), River suspended sediment concentration modeling using a neural differential evolution approach, Journal of Hydrology, Vol. 389, PP. 227-235.
- Minville, M., Brissette, F., Leconte, R., (2008), Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed, Journal of Hydrology, Vol. 358, PP. 70-83.
- Sivakumar, M.V.K., Das, H., Brunini, O., (2005), Impact of present and future climate variability and change agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics, Journal of Climate Change, Vol. 70, PP. 31-72.
- Sun, Q.H., Xia, J., Miao, C., Duan, Q., (2017), Bayesian multi-model projections of extreme hydro-climatic events under RCPs scenarios, Advances in Climate Change Research, Vol. 8, PP. 80-92.
- Tao, X., Chen, H., Xu, C., Hou, Y., Jie, M., (2015), Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China, Journal of Water Science and Engineering, Vol. 8, NO. 4, PP. 273-281.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J.A., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A.M., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masuri, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S., (2011), The representative concentration pathways: an overview, Journal of Climate Change, Vol. 109, PP. 5-31.
- Wilks, D.S., Wilby, R.L., (1999), The Weather Generation game: a review of Stochastic Weather Models, Progress in Physical Geography, Vol. 23, No. 3, PP. 329-357.

Research Article

Investigation of Temperature and Rainfall Parameters of Haraz River Basin affected by Climate Change

Eassa Kia¹, Valiollah Karimi^{2*}

1. Researcher of Soil Conservation and Watershed Management Department, Mazandaran Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran.

2*. Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management Department, Mazandaran Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran.

Received: 09-12-2019

Final Revised: 05-04-2021

Accepted: 22-04-2020

Abstract

Due to the low spatial resolution and simplification of atmosphere general circulation models compared to regional and short-term models, the outputs of these models cannot represent an accurate approximation of climatic conditions of the study area. Due to the time-consuming and lack of economic efficiency in the use of dynamic models, there has been increased public attention to the use of statistical downscaling methods. One of the most useful and common methods in statistical downscaling is SDSM. For this purpose, the first, the atmospheric parameters in the region over the past 32 years (1984-2015) was investigated by the Mann-Kendall test. The results showed that changes in temperature and rainfall data have a significant trend. Then, by downscaling, the data using SDSM software, the daily parameters of maximum, minimum, average temperature, and rainfall of Haraz river basin in Mazandaran province were simulated according to RCP2.6 (optimistic) and RCP8.5 (pessimistic) scenarios and CanESM2 Climatic Model from the new CMIP5 series in three periods of twenty years from 2020 to 2079. Finally, under the RCP8.5 critical scenario, until the end of the prediction period, the maximum, minimum, and average temperature of the basin will be increased 0.91, 1.13, and 0.96o C, respectively, and precipitation decreased 15.1% (7.4 mm) compared to the base period.

Keywords: Rainfall, Haraz River Basin, Downscaling, Temperature, SDSM model.

* Corresponding Author Email: v.karimi@areeo.ac.ir

References

References (in Persian)

- Aghakhani Afshar, A.H., Hassanzadeh, Y., Besalatpour, A.A., Pourreza-Bilondi, M., (2016), Annual assessment of Kashafrood watershed basin climate components in future periods by using the fifth report of the intergovernmental panel on climate change, *Journal of Water and Soil Conservation*, Vol. 23, No. 6, PP. 217-233. [In Persian]
- Goudarzi, M., Salahi, B., Hoseini, S.A., (2015), Investigation of climate change on Runoff changes (Case Study: Lake Urmia Watershed), *Ecohydrology*, Vol. 2, No. 2, PP. 175-189. [In Persian]
- Haghtalab, N., Goodarzi, M., Habibi Nokhandan, M., Yavari, A.R., Jafari, H.R., (2013), Climate Modeling in Tehran & Mazandaran Provinces by LARSWG and Comparing Changes in Northern and Southern Central Alborz hillside, Vol. 15, No. 1, PP. 37-49. [In Persian]
- Khademi, M., (2017), Investigation of climate change effects on optimum operations of the reservoir in flooding conditions based on Simulated Annealing Algorithm (Case Study: Alborz Reservoir Dam), Ph.D. The thesis of Water Works. Sari Agriculture and Natural Resource Science, 193 pp. [In Persian]
- Khalili Aghdam, N., Mosaedi, A., Soltani, A. Kamkar, B., (2012), Evaluation of LARS-WG ability in predicting of some meteorological parameters of Sanandaj, *Soil & Water Conservation Research Journal*, Vol. 19, No. 4, PP. 85-102. [In Persian]
- Mousavi, S.S., Karandish, F., Tabari, H., (2016), Temporal and spatial variation of rainfall in Iran under climate change until 2100, *Journal of Irrigation and Water Engineering*, Vol. 7, No. 25, PP. 152-165. [In Persian]
- Neshat, A., Sajadi Bami, Y., (2016), Predicting the impact of climate change on temperature parameter using HadCM3 general Circulation Software (case Study: Kerman & Bam), *Journal Management System*, Vol. 9, No. 30, PP. 51-62. [In Persian]
- Pirmia, A., Habibnejad Roshan, M., Solaimani, K., (2015), Investigation of precipitation and temperature changes in Caspian sea southern coasts and its comparison with changes in the northern hemisphere and global scales, *Journal of Watershed Management Research*, Vol. 6, No. 11, PP. 90-100. [In Persian]
- Sabouhi, R., Soltani, S., (2009), Analysis of climate factor trend of Iran's big cities, *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, Vol. 12, No. 46, PP. 303-321. [In Persian]
- Sayari1, N., Alizadeh, A., Bannayan Awal, M., Farid Hossaini, A., Hesami Kermani, M.R., (2011), Comparison of Two GCM Models (HadCM3 and CGCM2) for the Prediction of Climate Parameters and Crop Water Use under Climate Change, *Journal of Water and Soil*, Vol. 25, No. 4, PP. 912-625. [In Persian]

References (in English)

- Elo, A.R., Huttula, T., Peltonen, A. & Virta, J. (1998). The effects of climate change on the temperature conditions of lakes. *Boreal environment research*, 3, 137-150.
- Fiseha, B.M., Melesse, A.M., Romano, E., Volpi, E. & Fiori, A. (2012). Statistical downscaling of precipitation and temperature for the Upper Tiber Basin in Central Italy. *International Journal of Water Sciences*, 1(3), 1-10.
- Ghosh, S., Raje, D. & Mujumdar, P.P. (2010). Mahanadi streamflow: Climate change impact assessment and adaptive strategies. *Current Science*, 98(8), 1084-1091.
- Gulacha, M.M. & Mulungu, M.M. (2016). Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu river basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100, 62-72.
- Kisi, O. (2010). River suspended sediment concentration modeling using a neural differential evolution approach. *Journal of Hydrology*, 389, 227-235.
- Minville, M., Brissette, F. & Leconte, R. (2008). Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed. *Journal of Hydrology*, 358, 70-83.
- Sivakumar, M.V.K., Das, H. & Brunini, O. (2005). Impact of present and future climate variability and change agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Journal of Climate Change*, 70, 31-72.
- Sun, Q.H., Xia, J., Miao, C. & Duan, Q. (2017). Bayesian multi-model projections of extreme hydro-climatic events under RCPs scenarios. *Advances in Climate Change Research*, 8, 80-92.
- Tao, X., Chen, H., Xu, C., Hou, Y. & Jie, M. (2015). Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in the Xiangjiang River Basin. *China Journal of Water Science and Engineering*, 8(4), 273-281.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J.A., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A.M., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masuri, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J. & Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Journal of Climate Change*, 109, 5-31.
- Wilks, D.S. & Wilby, R.L. (1999). The Weather Generation game: a review of Stochastic Weather Models. *Progress in Physical Geography*, 23(3), 329-357.