مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره هفتم، شماره‌ی بیست و هشتم، تابستان ۱۳۹۶

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۲ تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۲/۲۲

صص ۵۹-۴۲

پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی‌های استان زنجان طی دوره‌ی ۲۰۵۰ – ۲۰۱۱ با استفاده از خروجی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (LARS-WG)

بهروز سبحانی*، دانشیار آب و هواشناسی - دانشگاه محقق اردبیلی

مسیح‌اله محمدی، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی - دانشگاه محقق اردبیلی

مریم تیموری، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی - دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

طبق مطالعات مرکز پیش‌بینی و تحقیقات هدلی در قرن ۲۱ به دلیل گرمایش جهانی، خشک‌سالی فراگیر و شدید، زندگی میلیون‌ها نفر در کره‌ی زمین را تهدید خواهد نمود. ازآنجایی‌که خشک‌سالی، بخش‌های مختلف جامعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا پایش و ارزیابی این پدیده در آینده به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح، امری ضروری است. بدین منظور، ابتدا باید داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی تولید شوند. در این مطالعه با استفاده از خروجی مدل‌های GCM و ریزمقیاس نمایی آن‌ها به کمک الگوی LARS-WG داده‌های بارش طی دوره‌ی ۲۰۵۰ – ۲۰۱۱ برای چهار ایستگاه در استان زنجان شبیه‌سازی شد. ازآنجایی‌که در مطالعات اقلیمی بحث عدم قطعیت وجود دارد، برای دست‌یابی به قطعیت بیش‌تر در نتایج باید از خروجی‌های مختلف مدل GCM همراه با سناریوهای انتشار متفاوت بهره برد. بر این اساس در تحقیق حاضر از چهار مدل اقیانوس جو(BCM2، HADCM3، HADGEM- A1 و IPCM4) و سناریو مختلف هر مدل استفاده شد و برای تعیین بهترین مدل از رابطه‌ی عکس قدر مطلق خطای هر مدل استفاده گردید و درنهایت مدل‌هایی که دارای بیش ترین ضریب وزنی بودند، به‌عنوان بهترین مدل برای مطالعه‌ی دوره‌ی آتی و فرآیند ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های آب و هوایی و درنهایت، مطالعه‌ی خشک‌سالی انتخاب شدند. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این مطلب است که پارامتر اقلیمی بارش طی ۴۰ سال آینده نسبت به دوره‌ی پایه رو به کاهش است؛ به‌طوری‌که کم‌ترین مقدار کاهش برای ایستگاه زنجان با ۲ میلی‌متر و بیش ترین مقدار کاهش برای ایستگاه خدابنده و ماه‌نشان با ۲۴ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. برای بررسی و ارزیابی وضعیت خشک‌سالی استان طی این دوره، از شاخص‌های خشک‌سالی SPI و PN استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهند که این دو شاخص هم‌خوانی خوبی باهم دارند و طی چهار دهه‌ی آینده، حداقل یک دهه شاهد خشک‌سالی خواهیم بود.

واژگان کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی، LARS-WG، زنجان، شاخص SPI، شاخص PN.

نویسنده‌ی مسئول: * Email: Sobhani@uma.ac.ir

۱- مقدمه

خشک‌سالی یکی از پدیده‌های زیان‌بخش جوّی است که وقوع آن تقریباً در تمام نقاط جهان محتمل است، ولی ویژگی‌های آن از منطقه‌ای به منطقه دیگر به‌طور محسوسی فرق می‌کند. برخلاف تصور اکثر افراد، خشک‌سالی رخدادی نادر و تصادفی نیست، بلکه حالتی نرمال و مستمر از اقلیم است؛ ولی ازآنجایی‌که به‌صورت تدریجی ظاهر می‌شود، روندی آهسته‌تر و نامحسوس‌تر نسبت به سایر بلایای طبیعی دارد. لازمه‌ی شناخت و مقایسه‌ی رویدادها بیان کمی و یا اندازه-گیری آن‌هاست(قربانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۴۱۷). دمای سطح زمین از اواسط قرن ۱۹ تاکنون روند افزایشی داشته است. در این دوره، سه دهه‌ی اخیر گرم‌ترین سال‌ها رو به خود اختصاص داده‌اند. اطلاعات ثبت‌شده حاکی از آن است که از سال ۱۹۰۱ تا سال ۲۰۱۲ دمای سطح زمین و اقیانوس‌ها به‌طور متوسط در حدود ۰/۸۹ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است. این روند افزایشی در دمای کره‌ی زمین و هم‌چنین تغییر در خصوصیات فیزیکی جوّ اشاره به تغییرات آب و هوایی دارد. درصورتی‌که اقدامات مناسبی در جهت کاهش اثرات تغیر اقلیم و سازگاری با آن صورت نگیرد، این پدیده می‌تواند بخش عمده‌ای از جهان، ازجمله کشاورزی، منابع آب و صنعت گردشگری را تحت تأثیر قرار دهد(طائی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۳: ۲). به‌منظور بررسی اثرات آینده‌ی تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف نظیر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت، صنعت، اقتصاد و غیره ابتدا باید متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تنش‌های ناشی از گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی شوند. معتبرترین ابزار موجود برای شبیه‌سازی اقلیمی آینده، استفاده از خروجی الگوهای گردش عمومی جفت شده جو - اقیانوس است(محمدلو و همکاران، ۱۳۹۳: ۸۱). این مدل‌ها که بر پایه‌ی قوانین فیزیکی و دینامیکی استوارند، عوامل جوّی و اقیانوسی را با استفاده از سناریوهای تأییدشده هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، مدل‌سازی می‌نماید. ضعف مدل‌های مذکور عدم توانایی آن‌ها در مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی در مقیاس نقطه‌ای ایستگاه‌های هواشناسی است(بحری و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۵۸)؛ بنابراین لازم است که خروجی این مدل‌ها در مقیاس ایستگاه‌ها ریزمقیاس شوند. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حاصل از مدل گردش معمولاً به دو روش آماری و دینامیکی صورت می‌گیرد. انواع مدل‌های ریزمقیاس نمای آماری عبارت‌انداز: SDSM،CLIMGEN ،LARS – WG،USCLIMATE(عباسی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۱۹). این مدل‌ها توانایی محاسبه‌ی متغیرها در سطح قابل‌قبول برای ایستگاه‌ها را دارند، ولی در شرایط مقادیر تاریخی (برون‌یابی) مقادیر محاسباتی غیرواقعی به دست می‌آید(رسولی و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۰).

۲- پیشینه تحقیق

از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌گردانی مدل‌های گردش عمومی به‌منظور پیش‌بینی تغییر اقلیم و اثرات آن استفاده‌ی زیادی صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آنان اشاره می‌شود: تغییرات آینده‌ی احتمالی، خطر خشک‌سالی در نیوزیلند تحت تغییرات اقلیمی توسط مولن بررسی شد. وی با استفاده از دو مدل HADCM و CSIRO 2 و با استفاده از یک تکنیک آماری با در نظر گرفتن تأثیر اقلیم بر روی توپوگرافی نیوزیلند خروجی مدل‌های مذکور را ریزمقیاس کرد(مولن- و همکاران، ۲۰۰۵). بلنکیسنسون[1] و فولر[2](۲۰۰۷) با استفاده از مدل گردش عمومی جو به بررسی خشک‌سالی‌های سال‌های آتی در انگلستان پرداختند. نتایج مطالعه‌ی ایشان حاکی از کاهش شدت و تداوم خشک‌سالی‌ها بوده است. از نظر لوکاس[3] و همکاران (۲۰۰۸) تغییر متغیرهای اقلیمی ازجمله(دما و بارندگی) در اثر تغییر اقلیم سبب تغییراتی در شدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها خواهد شد. لی[4] و همکاران (۲۰۰۹) طبق چهارمین گزارش ارزیابی IPCC، بیان کردند که بیشتر مدل‌های گردش کلی جوّ - اقیانوس(AOGCMs) افزایش خشکی در مناطق وسیعی از عرض‌های جغرافیایی میانی و بالا را پیش‌بینی می‌کند (IPCC، ۲۰۰۷)؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که فرض‌های سناریوهای

1- Blenkinsop
2- Fowler
3- Loukas
4- Li

گوناگون اقلیمی (تغییرات افزایشی و کاهشی و یا ثبات نرمال‌های اقلیمی) در پایش خشک‌سالی نمود یابد و در تحلیل مارکوف به شکل تغییر در مقادیر احتمالات انتقال و یا تغییر طبقات پیش‌آگاهی شده بروز کند. دابروسکی۵ و همکاران(۲۰۰۹) کاربرد شاخص‌های خشک‌سالی SPI و PSDI را در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی موردبررسی قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه از ۵ مدل گردش عمومی جو HADCM3، GFDL-R30، CRIRO،CGCM2، CCSR/NIIES و سناریوی انتشار A2 برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده نمودند که در تمامی مدل‌ها، بارش در زمستان کاهش و در تابستان افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب این موضوع موجب افزایش ریسک خشک‌سالی در دوره‌ی موردمطالعه در آینده خواهد شد. بورک۶ و براون۷(۲۰۱۰) ابزاری برای ارزیابی پدیده‌های خشکی منطقه بر اساس دوره‌های محدود را گسترش داده و آن‌ها را برای خروجی مدل آب و هوایی منطقه‌ای به کار می‌گیرند تا تغییرات بالقوه‌ی آینده در خشکی را به دلیل گازهای گلخانه‌ای فزاینده، بررسی کنند؛ اگرچه مشخصه‌های ترکیبی خشکی (Had RM3) به‌طورکلی تنوع طبیعی مشاهده‌شده را بیش‌تر برآورد می‌کند و شدت در هر منطقه را ناچیز نشان می‌دهد. پیش‌بینی‌های (Had RM3) به افزایش شدت خشکی در نیمه‌ی دوم قرن ۲۱ اشاره دارد. دای۸(۲۰۱۰) مطالعه‌ای را در مورد روند خشک‌سالی تحت شرایط تغییر اقلیم در جهان، ارائه نمود. در این مطالعه اکثر مدل‌های اقلیمی برای دوره‌ی پایانی قرن ۲۱ و برای اکثر نواحی افریقا، اروپای جنوبی، خاورمیانه و نیز قسمت‌های زیادی از آمریکا، جنوب شرق آسیا و استرالیا افزایش خشکی را پیش‌بینی کرد. سوسا۹ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ روند شاخص‌های خشک‌سالی را در طول قرن بیستم در مدیترانه موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها روند افزایشی در شرایط خشکی در نواحی غرب و مرکزی مدیترانه و روند افزایشی در موجودیت آب در شمال غرب آسیا و اکثر نواحی ترکیه را نشان داد. وای تسینگ۱۰ و همکارانش(۲۰۱۲) برای بررسی ویژگی‌های زمانی بارش از قبیل تعداد روزهای مرطوب، تعداد روزهای تداوم مرطوب و خشک‌سالی حوضه‌ای در تایوان از سه مولد اقلیمی و خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل‌های GCM تحت سناریو AIB طی دوره‌ی ۲۰۳۹-۲۰۲۰ استفاده نمود که نتایج نشان از تمایل افزایش بارش و کاهش خشک‌سالی داشت. گل محمدی و مساح (۱۳۸۹) با استفاده از مدل HadCM3 و شاخص SPI و سناریوی خانواده A2 به ارزیابی اثرات گرمایش جهانی در خشک‌سالی‌ها حوضه‌ی قره‌سو برای سال ۲۰۴۰- ۲۰۶۹ پرداختند و نتایج نشان داد که در بستر تغییرات اقلیم، میزان بارش در منطقه افزایش و به‌تبع آن شدت خشک‌سالی‌ها کاهش خواهد یافت. روشن و نجفی (۱۳۹۰) به بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های آینده کشور پرداختند. نتایج و خروجی‌های شبیه‌سازی برای خشک‌سالی‌ها، در دهه‌های آینده نشان می‌دهند که نواحی غرب خزر و گیلان، به همراه نواحی غرب کرمانشاه و ایلام است که بالاترین ترسالی‌ها را تجربه خواهند کرد. از طرف دیگر نواحی شمال خراسان و شمال خراسان رضوی، از بالاترین ریسک رخداد خشک‌سالی برای سال‌ها و فصول شبیه‌سازی‌شده برخوردار می‌باشند. معافی معدنی و همکاران (۱۳۹۱) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی استان خراسان رضوی طی دو دهه‌ی آینده با استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی دهک (DI) و بارش استانداردشده‌ی (SPI) پرداختند. نتایج نشان داد که به‌استثنای ایستگاه تربت جام، به دلیل افزایش ساعت آفتابی و درنتیجه کاهش بارندگی، افزایش خشک‌سالی را نشان می‌دهد. در حالت کلی در بیش از ۹۰ درصد ایستگاه‌های سینوپتیک استان خراسان رضوی طی بیست سال آینده، وضعیت ترسالی افزایش می‌یابد. زیرک‌زاده و بذرافشان (۱۳۹۲) شدت خشک‌سالی را تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل (CGCM3) در استان اصفهان بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد به‌طورکلی در دوره‌ی آینده نسبت شدت خشک‌سالی در مقایسه با گذشته به ازای دوره‌ی بازگشت‌های مختلف کاهش می‌یابد. مظفری و همکاران (۱۳۹۴) شرایط خشک‌سالی در استان سیستان و بلوچستان طی

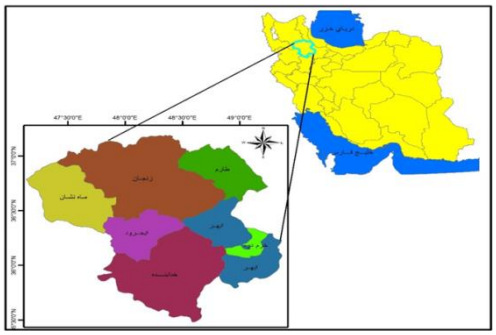
5- Dubrovsky et al
6- Burke
7- Brown
8- Dai
9- Sousa
10- Wei Tseng

(۱۳۹۱-۱۴۱۰) را با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو موردمطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها از افزایش ۸ درصدی بارش در استان و کاهش تعداد روزهای یخبندان و افزایش میانگین سالانه دما در حدود ۰/۳ درجه‌ی سلسیوس است. به‌طورکلی، خشک‌سالی‌های این استان در دوره‌ی ۱۴۱۰ – ۱۳۹۱ کاهش می‌یابد. پورعلی حسین و مساح بوانی(۱۳۹۴) وضعیت خشک‌سالی استان آذربایجان شرقی را در دوره‌ی آتی با شاخص بارش استانداردشده‌ی (SPI) بررسی کردند. نتایج نشان داد در سال ۲۰۲۱ خشک‌سالی بسیار زیاد در نواحی شرقی استان رخ خواهد داد و می‌توان این سال را خشک‌ترین سال دوره قلمداد کرد؛ به‌طوری‌که درمجموع ۵۹/۳۷۵ درصد استان داری شرایط خشک خواهد بود. برای سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸ نیز در برخی نقاط خشک‌سالی پیش‌بینی می‌شود. درحالی‌که سال ۲۰۱۹ در تمامی نقاط از شرایط نزدیک به نرمال برخوردار خواهد بود. سال ۲۰۲۰ تنها سالی است که رطوبت بسیار زیادی را تجربه خواهد کرد.

در این مطالعه به‌منظور شناسایی و پیش‌بینی خشک‌سالی و روزهای خشک استان زنجان از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری با استفاده از یک مدل مولد داده‌های هواشناسی به نام LARS-WG استفاده شده است.

۳- منطقه مورد مطالعه

استان زنجان که آن را فلات زنجان نیز می‌نامند، در ناحیه مرکزی شمال غربی ایران واقع شده است. این استان در ۴۷ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی خط استوا، با مساحتی نزدیک به ۳۹۳۶۹ کیلومترمربع قرار گرفته است. استان زنجان از شمال به استان‌های اردبیل و گیلان، از شرق به استان قزوین، از جنوب به استان همدان، از جنوب غربی و غرب به استان‌های کردستان و آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی محدود است و ازجمله استان‌هایی است که به‌تنهایی با ۷ استان کشور همسایه و هم‌جوار است. اوضاع جوی و شرایط اقلیمی منطقه بر حسب پستی‌وبلندی‌ها سخت متغیر است. من‌حیث‌المجموع ارتفاعات دارای آب‌وهوای سرد کوهستانی، زمستانی پربرف و سرد و تابستانی معتدل و خشک است. در این میان، دره‌های قزل‌اوزن دارای آب‌وهوای معتدل‌تر بوده و دارای زمستانی معتدل و تابستانی نسبتاً گرم است. جلگه‌های مابین ارتفاعات نظیر جلگه‌ی سجاس، منطقه قشلاقات اقشار و قسمت سفلای زنجان رود دارای آب‌وهوای معتدل‌تری هستند. بر اساس آمار و گزارش‌های هواشناسی(از بدو تأسیس ایستگاه‌ها تا سال ۲۰۱۴) میانگین حداکثر درجه‌ی حرارت سالانه ۳۷/۱+ درجه‌ی سانتی‌گراد و میانگین حداقل درجه حرارت سالانه ۱۹/۵- درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی موردمطالعه

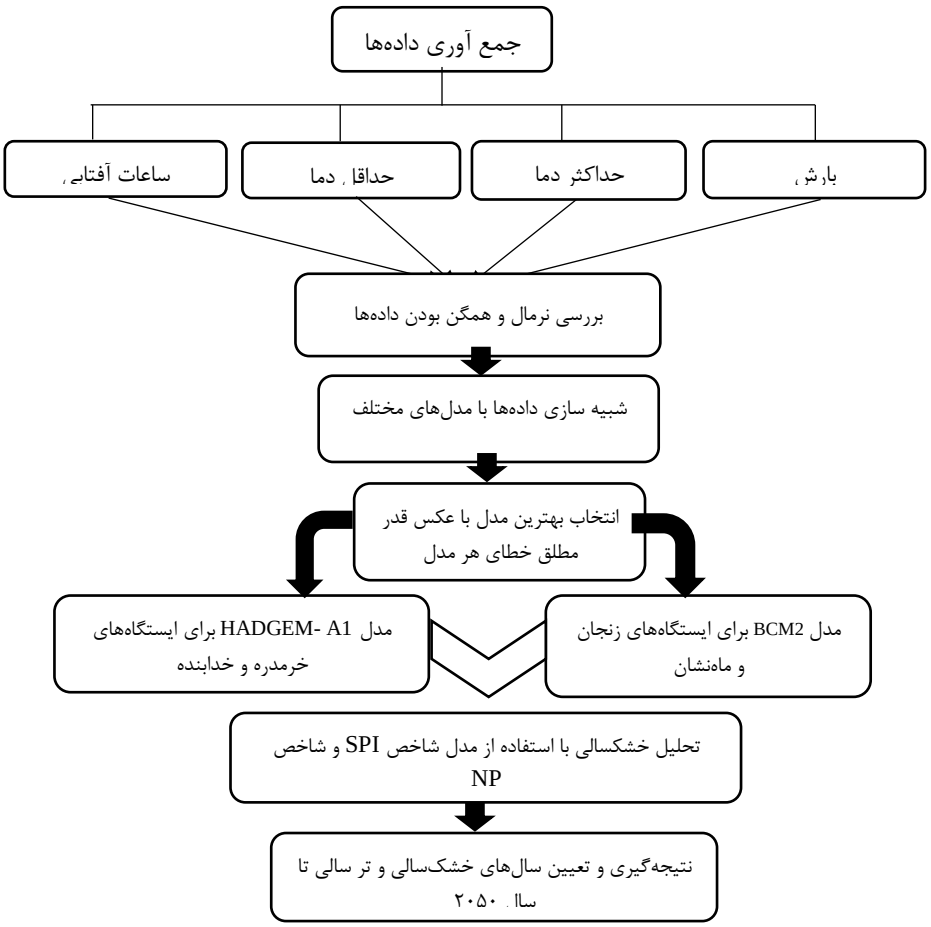
۴- مواد و روش‌ها

هدف از این پژوهش، بررسی تغییر اقلیم استان زنجان طی دوره‌ی آتی(۲۰۵۰ -۲۰۱۱) است. برای شبیه‌سازی و تولید مصنوعی داده‌های بارش، دمای حداکثر و حداقل به‌عنوان اثرگذارترین عناصر مؤثر بر تغییر اقلیم طی دوره‌ی آتی، چهار ایستگاه سینوپتیک زنجان، خدابنده، خرمدره و ماه‌نشان موردبررسی قرار گرفت. در ابتدا نرمال بودن داده‌های این ایستگاه‌ها بررسی شد و همگنی آن‌ها با استفاده از آزمون ران تست مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد از اطمینان از دقت

داده‌ها و همگنی آن‌ها در سطح ۹۵ درصد، داده‌های مذکور که شامل بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و ساعات آفتابی بود، برای شبیه‌سازی انتخاب شدند. ازآنجایی‌که در مطالعات اقلیمی بحث عدم قطعیت وجود دارد، برای دست‌یابی به قطعیت بیش‌تر در نتایج باید از خروجی‌های مختلف مدل GCM همراه با سناریوهای انتشار متفاوت بهره برد. چون مدل‌های GCM، داری پارامتر اقلیمی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۵۰ میلادی هستند، با مقایسه داده‌های پیش‌بینی دوره‌ی گذشته(پیش‌بینی گذشته‌نگر) با مقادیر مشاهداتی، می‌توان صحت و وزن آن‌ها را یافت و در آینده اعمال کرد. بر این اساس در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های بارندگی چهار مدل اقیانوس جو(BCM2، HADCM3، HADGEM- A1 و IPCM4) مربوط به سال‌های(۲۰۱۰ -۱۹۸۰) میلادی، داده‌های دیده‌بانی بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک استان زنجان و با کمک رابطه عکس قدر مطلق خطای هر مدل، وزن هر مدل در بازه زمانی موردنظر طبق رابطه زیر، محاسبه گردید و درنهایت مدل‌هایی که دارای بیش ترین ضریب وزنی بودند(با توجه به رابطه‌ی ۱)، به‌عنوان بهترین مدل برای مطالعه‌ی دوره‌ی آتی و فرآیند ریزمقیاس نمایی و تولید داده‌های آب و هوایی و درنهایت مطالعه‌ی خشک‌سالی انتخاب شد.

رابطه‌ی ۱ $\frac{1}{ABS(\Delta T(GCM))}$

در این رابطه ABC به معنایی قدر مطلق و $\Delta T(GCM)$ اختلاف مقادیر پارامتر اقلیمی موردنظر دیدبانی‌شده در ایستگاه موردمطالعه با مقادیر به‌دست‌آمده از مدل‌های GCM مختلف برای آن منطقه و مربوط به دوره‌ی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ میلادی است. درنهایت مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۱) برای مدل‌های مختلف و به ازای تمام سال‌ها باهم جمع شدند و فراوانی نسبی برای هر سال به دست آمد. سپس با میانگین‌گیری از آن به ازای تمام سال‌ها، وزن هر مدل نیز محاسبه شد. جدول (۱) تا (۴) نتایج حاصل از وزن چهار مدل انتخابی GCM و انتخاب بهترین مدل برای ایستگاه‌های زنجان را نشان می‌دهد.



شکل ۲: مراحل انجام تحقیق و مدل‌سازی فضایی(منبع: نگارندگان)

جدول ۱: ضریب وزنی مدل‌های GCM برای ایستگاه زنجان

نوع مدل	BCM2	HADCM3	HADGEM- A1	IPCM4
ضریب وزنی	۰/۰۰۱۹۹	۰/۰۰۱۸۹	۰/۰۰۱۹۳	۰/۰۰۱۹۱

جدول ۲: ضریب وزنی مدل‌های GCM برای ایستگاه خدابنده

نوع مدل	BCM2	HADCM3	HADGEM- A1	IPCM4
ضریب وزنی	۰/۰۰۱۷۳	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۱۷۴	۰/۰۰۱۷۱

جدول ۳: ضریب وزنی مدل‌های GCM برای ایستگاه خرمدره

نوع مدل	BCM2	HADCM3	HADGEM - A1	IPCM4
ضریب وزنی	۰/۰۰۱۹۰	۰/۰۰۱۸۴	۰/۰۰۱۹۲	۰/۰۰۱۸۷

جدول ۴: ضریب وزنی مدل‌های GCM برای ایستگاه ماه‌نشان

نوع مدل	BCM2	HADCM3	HADGEM- A1	IPCM4
ضریب وزنی	۰/۰۰۳۰۲	۰/۰۰۲۱۳	۰/۰۰۲۱۶	۰/۰۰۲۱۴

با توجه به نتایج حاصل از میانگین ضرایب وزنی مدل‌های GCM و جداول ۱ تا ۴ برای ایستگاه‌های زنجان و ماه‌نشان مدل BCM2 و برای ایستگاه خرمدره و خدابنده مدل HADGEM- A1 دارای بیش‌ترین وزن هستند و برای ریزمقیاس-نمایی ایستگاه‌های زنجان از این مدل استفاده می‌شود.

۴-۱- معرفی مدل و شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی

مدل LARS-WG یکی از مدل‌های مولد داده‌های تصادفی هواشناسی است که برای تولید داده‌های روزانه بارش، تابش، بیشینه و کمینه دمای یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار می‌رود در این مدل، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو به روش‌های آماری به‌گونه‌ای ریزمقیاس می‌شوند که به مقدار واقعی بسیار نزدیک باشد(معدنی معافی، ۱۳۹۱: ۲۶). مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌ی خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش، توزیع نیمه تجربی است. در توزیع نیمه‌ی تجربی فاصله‌ها به‌طور مساوی بین مقادیر ماکزیمم و مینیمم سری ماهانه تقسیم می‌شوند:

رابطه‌ی ۲ $EMP= \{a_0,a_i;h_i,\ldots, i=0,1,2,\ldots,10\}$

در اینجا EMP یک هیستوگرام با ده بازه با شدت‌های مختلف بارش است.

رابطه‌ی ۳ $[a_{i-1}, a_i] \qquad a_{i-1}< a_i$

h_i تعداد رخداد بارش در i امین فاصله را نشان می‌دهد.

فاصله‌ها برای طول روزهای تر و خشک و بارش افزایشی هستند. در این مدل تابش به‌طور مستقل از درجه حرارت مدل شده است و به‌جای آن، می‌توان از ساعات آفتابی نیز استفاده کرد. مقدار بارش یک روز تر از توزیع نیمه‌ی تجربی بارش ماه موردنظر و مستقل از سری‌های تر یا مقدار بارش در روز قبل به دست می‌آید(بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۳۹). در این مدل سری‌های فوریه، درجه حرارت را تخمین می‌زنند. درجه حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به‌صورت فرآیندهایی تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت‌تر یا خشک بودن روز موردنظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه مرتبه h_i سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار درجه حرارت فصلی به کار می‌رود. مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیدبانی‌شده به دست می‌آیند، در تحلیل همبستگی زمانی داده‌های مینیمم و ماکزیمم مورداستفاده قرار می‌گیرند(مظفری و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۰۵). خروجی‌های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش می‌باشند. تولید داده توسط مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌شود

که عبارت‌اند از: کالیبره کردن، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی. در این مدل ابتدا داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G شامل بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و تابش به‌صورت روزانه استخراج‌شده و برای هر شبکه مدل ECHO-G یک سناریوی خاص مدل LARS-WG تدوین می‌شود. برای تدوین این سناریو بایستی داده‌های شبکه‌ای مدل ECHO-G در دوره‌ی آینده با داده‌های دوره‌ی پایه مقایسه شوند. در این مطالعه، دوره‌ی پایه ۲۰۱۰-۱۹۹۰ و دوره‌ی آینده ۲۰۵۰-۲۰۱۱ در نظر گرفته شده است. برای اجرای مدلLARS-WG علاوه بر سناریوی تدوین‌شده برای هر شبکه‌ی F_{FUT} محاسباتی، به فایل مشخصه رفتار اقلیم گذشته ایستگاه‌های واقع در داخل آن شبکه نیز نیاز است. سپس این مدل با دریافت فایل محتوی رفتار اقلیم گذشته ایستگاه و فایل سناریوی تولید داده، مقادیر روزانه دمای کمینه، بیشینه، بارش و تابش روزانه را در آینده محاسبه می‌کند. مکانیسم عمل مدل به این صورت است که در ابتدا با استفاده از سناریوی تولید داده ماهانه که دربرگیرنده‌ی رفتار اقلیم پایه است، تمامی داده‌های ماهانه را مطابق فرمول:

رابطه‌ی ۴ $$F_{fut} = F_{obs} + (F_{GCM}^{fut} - F_{GCM}^{abse})$$

کالیبره می‌کند که در آن F_{fut}، F_{obs}، F_{GCM}^{fut} و F_{GCM}^{abse} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی پارامتر هواشناسی پیش‌بینی شده بر روی ایستگاه هواشناسی، پارامتر هواشناسی دیده‌بانی شده در همان ایستگاه، پارامتر هواشناسی پیش‌بینی شده بر روی شبکه‌ی مدل در دوره‌ی آینده و پارامتر هواشناسی مدل شده بر روی شبکه‌ی مدل در دوره‌ی گذشته می‌باشند. سپس با حفظ میانگین، انحراف معیار آن‌ها را مطابق فرمول:

رابطه‌ی ۵ $$STD_{fut} = \frac{STD_{fut}^{GCM}}{STD_{abse}^{GCM}} \times STD_{abse}^{obs}$$

تغییر می‌دهد که در آن STD انحراف معیار پارامتر هواشناسی تحت بررسی است(بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۴۰).

۴-۲- سناریوی غیراقلیمی (سناریوی انتشار)

ازآنجاکه تغییرات اقلیمی آینده به‌شدت به فعالیت‌های بشری در سال‌های آینده بستگی دارد، مدل‌های اقلیمی با استفاده از داده‌های سناریوهای انتشار اجرا می‌شوند. به‌طورکلی ۴۰ سناریوی مختلف وجود دارند که هرکدام فرضیات متفاوتی از میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، پوشش سطح زمین و دیگر واداشت‌های اقلیمی در آینده را مدنظر قرار دادند. علاوه بر آن، فرضیاتی برای نحوه‌ی توسعه‌ی فنی و رشد اقتصادی آینده کشورها را در نظر گرفته‌اند. این سناریوها، پیش‌تر افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی را در نظر می‌گیرند. در بین سناریوهای موجود، سناریوی B1 یک حالت خوش‌بینانه از آینده و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. سناریوی A2 یک حالت اغراق‌آمیز و سناریوی A1B یک حالت متعادل و مابین دو حالت خوش‌بینانه و بدبینانه را در نظر می‌گیرد(محمدلو، ۱۳۹۳:۸۴). ازآنجایی‌که اکثر مدل‌های GCM نیز بر اساس این سه سناریو طراحی شده‌اند و نیز به دلیل عدم قطعیت دوره‌های آتی، در شبیه‌سازی دوره‌های آتی در این مطالعه از سه سناریوی مذکور استفاده می‌شود.

۴-۳- شاخص‌های خشک‌سالی

قرارگیری ایران در نواحی خشک یا بیابانی سبب شده است که به‌طور طبیعی در آن، سال‌های با مقدار بارندگی کمتر از میانگین به‌مراتب بیش‌تر از سال‌های با مقدار بارندگی بیش از میانگین درازمدت سالانه باشد. خشک‌سالی یکی از مزمن‌ترین بلایای طبیعی است. در دهه‌های اخیر در میان حوادث طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده‌اند، فراوانی این پدیده، بیش از سایر حوادث بوده است. جلوگیری کامل از کمبود آب ممکن نیست لیکن با تحلیل سوابق تاریخی پدیده خشک‌سالی و با تکیه بر آمار و اطلاعات موجود می‌توان زمینه‌های آمادگی و صرفه‌جویی را برآورد کرد و با ایجاد طرح‌های آمادگی تا حد زیادی خسارات آن را کاهش داد(صفدری و همکاران، ۱۳۸۲: ۴۶۷). کمبود ذاتی منابع آب در کشور از یک‌سو و بروز خشک‌سالی‌های پیاپی در سال‌های اخیر و افزایش چشمگیر استفاده از منابع زیرزمینی

از سوی دیگر ایجاب می‌نماید که بیش‌ازپیش به نحوه و میزان اثرات خشک‌سالی‌ها در منابع آب‌های زیرزمینی پرداخته شود تا بتوان به مدیریت صحیح و جامع منابع آب در مقاطع بحرانی همت گماشت(علیجانی و بابایی، ۱۳۸۸: ۱۱۰)

برای تحلیل فضایی خشک‌سالی‌ها ارائه‌ی شاخصی که در آن مقیاس زمانی مدنظر قرار گرفته باشد، از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از این روش‌ها نمایه بارش استانداردشده‌ی (Standard Precipitation Index=SPI) است.

۴-۳-۱- شاخص SPI (شاخص بارش استانداردشده)

SPI از بهترین و جامع‌ترین و درعین‌حال ساده‌ترین روش‌های مطالعه‌ی خشک‌سالی و ترسالی و خصوصیات آن‌ها محسوب می‌شود. این شاخص در سال ۱۹۹۵ توسط مک کی و همکاران ارائه شد. شاخص SPI برای هر نقطه بر اساس ثبت بارندگی‌های طولانی‌مدت محاسبه می‌شود. در ابتدا توزیع آماری مناسب با آمار بلندمدت بارندگی‌ها، برازش داده می‌شود. سپس تابع تجمعی توزیع با استفاده از احتمالات مساوی به توزیع نرمال تبدیل می‌گردد؛ به‌طوری‌که استاندارد شده و متوسط آن برای هر منطقه و دوره‌ی موردنظر صفر شود(ادوارد و مک‌کی[11]،۱۹۹۷: ۴). مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده‌ی بارندگی بیش از بارش متوسط است و مقادیر منفی آن معنای عکس حالت یادشده را دارد. طبق این روش، دوره‌ی خشک‌سالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کمتر از آن برسد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت شود. اساس این شاخص انحراف از میانگین نسبت به انحراف معیار داده‌های آماری است؛ به‌عبارت‌دیگر در این روش علاوه بر انحراف از میانگین بارش‌های رخداده طی یک دوره‌ی آماری، انحراف معیار داده‌ها نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که نسبت اختلاف میانگین جامعه یا نمونه از مقدار بارندگی هر سال آماری به انحراف معیار جامعه یا نمونه محاسبه می‌شود. این شاخص را می‌تواند در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد و معادله‌ی آن به‌صورت رابطه‌ی (۴) است. محاسبه‌ی SPI برای هر مکان، بر اساس ثبت بارش‌های طولانی‌مدت در دوره‌ی زمانی موردنظر پایه‌گذاری شده است. داده‌های طولانی‌مدت ثبت‌شده با یک توزیع احتمالاتی پردازش داده می‌شوند و سپس به یک توزیع نرمال تبدیل می‌گردند؛ به‌طوری‌که میانگین SPI برای هر منطقه با دوره‌ی موردنظر صفر است.

رابطه‌ی ۶
$$SPI = \frac{P_i - \overline{P}}{SD}$$

که در آن P_i بارندگی تجمعی دوره‌ی i، SD انحراف معیار بارش در طول دوره‌ی آماری و$\overline{P}$ میانگین بارندگی بلندمدت است. با منفی شدن این شاخص، خشک‌سالی آغاز و با کم‌تر شدن مقادیر بر شدت آن افزوده می‌شود. هنگامی‌که این شاخص مثبت می‌گردد، خشک‌سالی پایان می‌یابد. طبقات مختلف این شاخص در جدول (۵) آمده است(محمدلو و همکاران، ۱۳۹۳: ۸۴).

جدول ۵: نمایه‌ی SPI از(خلیقی و همکاران،۱۳۹۱: ۱۲۴)

طبقه‌بندی خشک‌سالی	شاخص SPI
فوق‌العاده مرطوب	X ≥ +2
خیلی مرطوب	1.99 1.5
نسبتاً مرطوب	1.49 1
نزدیک به نرمال	0.99 0.99
نسبتاً خشک	-1.49 -1
خشک‌سالی شدید	-1.99 -1.5
فوق‌العاده خشک	X ≤ -۲

11- Edwars and Mckee

۴-۳-۲- شاخص درصد بارندگی (PN)

درصد نرمال بارندگی یکی از ساده‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی است. این امر سبب شده است تا محققین زیادی، به‌خصوص محققین استرالیایی، از آن استفاده نمایند. این شاخص از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

رابطه‌ی ۷ $$PN = \frac{P_i}{\bar{P}} \times 10$$

که در آن P_i، میانگین بارندگی در سال‌های آماری است. این شاخص همواره مثبت و از سمت پایین محدود به صفر است و از قسمت بالا از نظر تئوری محدودیتی ندارد. طبقات مختلف این شاخص در جدول (۶) آمده است.

جدول ۶: مقادیر شاخص PN(خلیلی و بذرافشان، ۱۳۸۲)

طبقه‌بندی خشک‌سالی	شاخص PN
نرمال	>٪۸۰
ضعیف	۷۰٪ – ۸۰
متوسط	۵۵٪ – ۷۰
شدید	۴۰٪ – ۵۰
بسیار شدید	۴۰٪<

۵- بحث و نتایج

۵-۱- شبیه‌سازی و تولید داده‌های اقلیمی دوره‌ی ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ میلادی توسط مدل لارس - دبیلو جی

مدل لارس – دبلیو جی یکی از مشهورترین مدل‌های تولید داده‌های هواشناسی است که برای تولید مقادیر داده‌های روزانه‌ی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش آفتابی در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حاضر و اقلیم آینده به کار می‌رود. این مدل از سه بخش تشکیل شده است که عبارت‌اند از: واسنجی، ارزیابی و تولید و شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آتی. در مرحله ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از آمارهای ضریب تبیین(R^2)، میانگین مربعات خطا) (RMSE) و میانگین خطای مطلق(MAE) که به ترتیب به‌صورت روابط ۶، ۷ و ۸ هستند. داده‌های تولیدشده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی(واقعی) موجود در دوره‌ی پایه ارزیابی گردید.

رابطه‌ی ۸ $$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})\right]^2}{\sum_{i-1}^{n}(X_i - \bar{X})^2 \sum_{i-1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2}$$

رابطه‌ی ۹ $$RMSE = \sqrt{\sum_{i-1}^{n} \frac{(X_i - \bar{Y}_i)^2}{n}}$$

رابطه‌ی ۱۰ $$MAE = \frac{\sum_{-1}^{n} |X_i - Y_i|}{n}$$

که در این رابطه X_i و Y_i به ترتیب i ام داده‌های واقعی(مشاهده‌شده) و شبیه‌سازی‌شده (توسط مدل)، $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ میانگین کل داده‌ها X_i و Y_i در جامعه‌ی آماری و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی است. پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی، در مرحله‌ی بعدی اقدام به تولید داده‌های آتی می‌شود. نتایج ارزیابی این ریزگردان آماری در جدول ۷، برای چهار ایستگاه زنجان، خدابنده، خرمدره و ماه‌نشان آمده است.

جدول ۷: نتایج ارزیابی ریزگردان آماری لارس - دبیلو جی

آماره	زنجان	خرمدره	خدابنده	ماه‌نشان
R^2	۰/۷۹	۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۹۲
RMSE	۴/۳۴	۲/۷۴	۳/۴۰	۳/۵۶
MAE	۳/۵۱	۱/۸	۲/۷۱	۲/۹۱

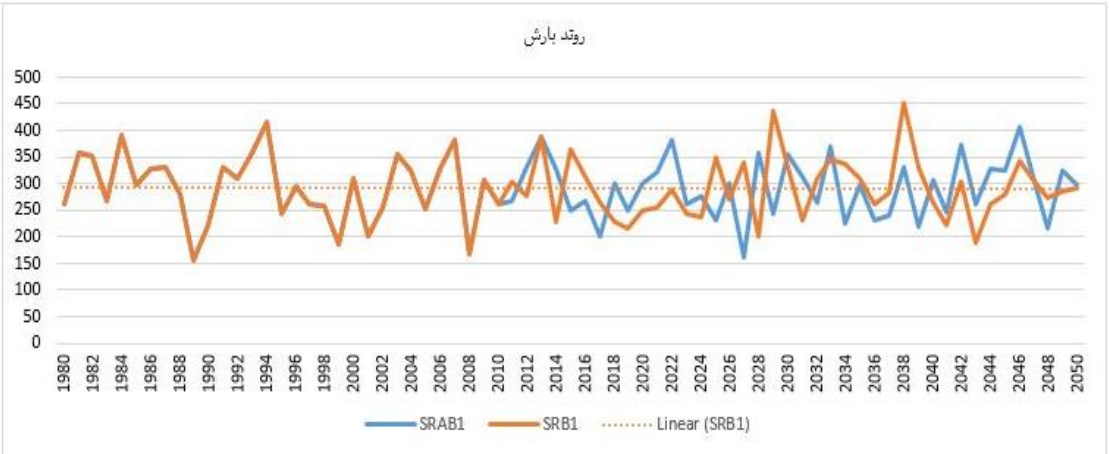
جدول بالا بیانگر میزان توانمندی ریزگردان آماری لارس ـ دبیلو جی در شبیه‌سازی پارامتر اقلیمی بارش در مقیاس سالانه است. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود مقادیر بارش شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده تطابق خوبی با هم دارند؛ بنابراین می‌توان به داده‌های بیش بینی شده مدل لارس - دبیلو جی در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی این ایستگاه‌ها اطمینان کرد. جداول(۸) و (۹) مدت و فراوانی خشک‌سالی ۴۰ سال(۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰) را با استفاده از شاخص SPI و شاخص درصد بارندگی NP برای چهار ایستگاه زنجان، ماه‌نشان، خرمدره و خدابنده نشان می‌دهد.

جدول ۸: نتایج حاصل از شاخص SPI سالانه با نرم‌افزار DIC برای ایستگاه‌های استان زنجان

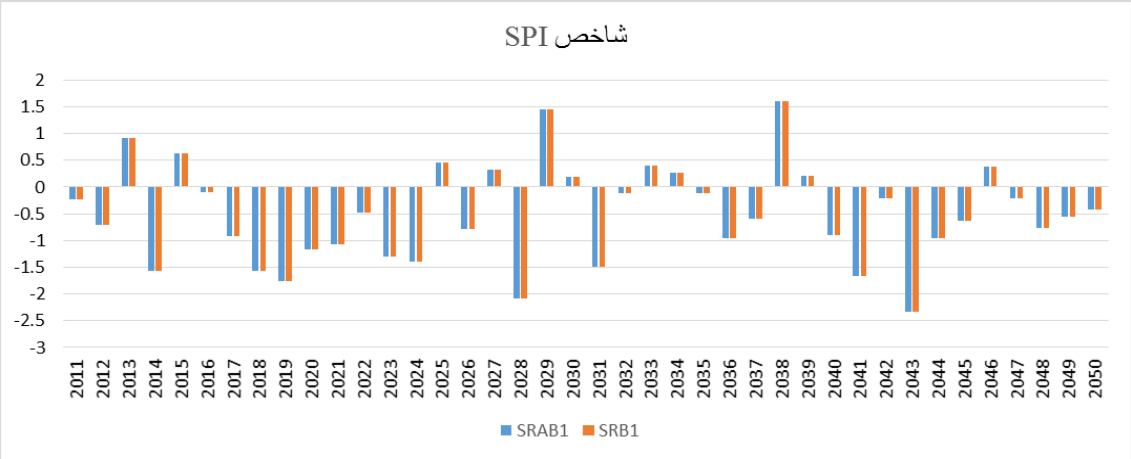
نام ایستگاه	مدل	سناریو	فوق‌العاده مرطوب	خیلی مرطوب	نسبتاً مرطوب	نزدیک به نرمال	خشک ملایم	خشک شدید	فوق‌العاده خشک
زنجان	BCM2	SRAB1	-	۱	۱	۲۷	۵	۴	۲
		SRB1	-	۱	۲	۲۷	۵	۳	۲
خدابنده	HADGM - A1	SRA1B	-	۱	-	۲۶	۴	۶	۳
		SRA2	-	۱	-	۲۶	۵	۵	۳
خرمدره	HADGM - A1	SRA1B	-	۱	۲	۲۳	۶	۶	۲
		SRA2	-	۱	-	۲۸	۵	۳	۳
ماه‌نشان	BCM2	SRAB1	-	۱	-	۳۰	۶	۳	-
		SRB1	-	۱	-	۳۰	۴	۳	۲

جدول ۹: نتایج حاصل از شاخص PN سالانه با نرم‌افزار DIC برای ایستگاه‌های استان زنجان

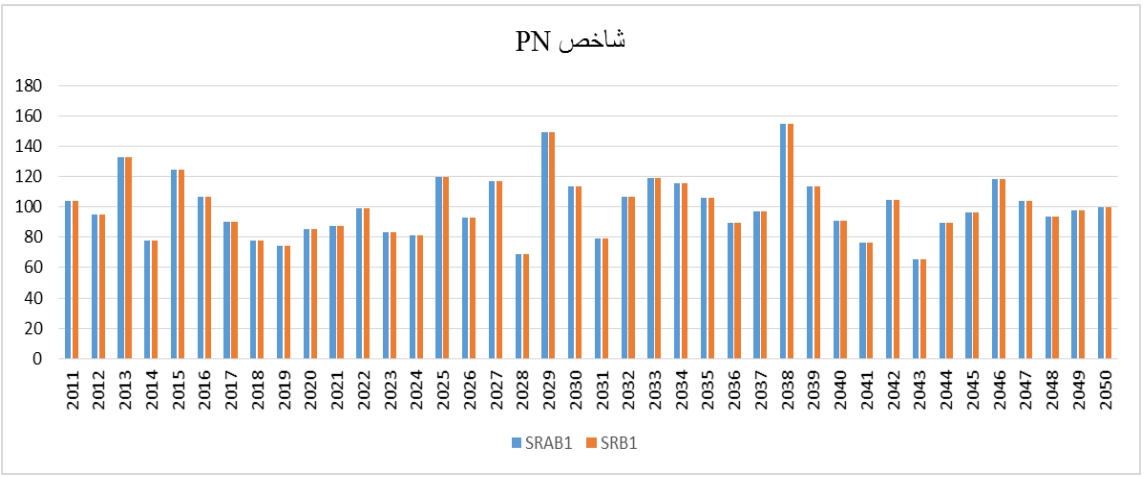
نام ایستگاه	مدل	سناریو	نرمال	ضعیف	متوسط	شدید	بسیار شدید
زنجان	BCM2	SRAB1	۳۳	۵	۲	-	-
		SRB1	۳۳	۵	۲	-	-
خدابنده	HADGM - A1	SRA1B	۳۱	۵	-	۴	-
		SRA2	۳۱	۵	۴	-	-
خرمدره	HADGM - A1	SRA1B	۳۳	۶	۱	-	-
		SRA2	۳۲	۵	۳	-	-
ماه‌نشان	BCM2	SRAB1	۳۴	-	۴	۲	-
		SRB1	۳۴	۳	۲	۱	-



شکل ۳: روند بارش سالانه برای ایستگاه زنجان از بدو تأسیس و پیش‌بینی شده با مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 تا سال ۲۰۵۰

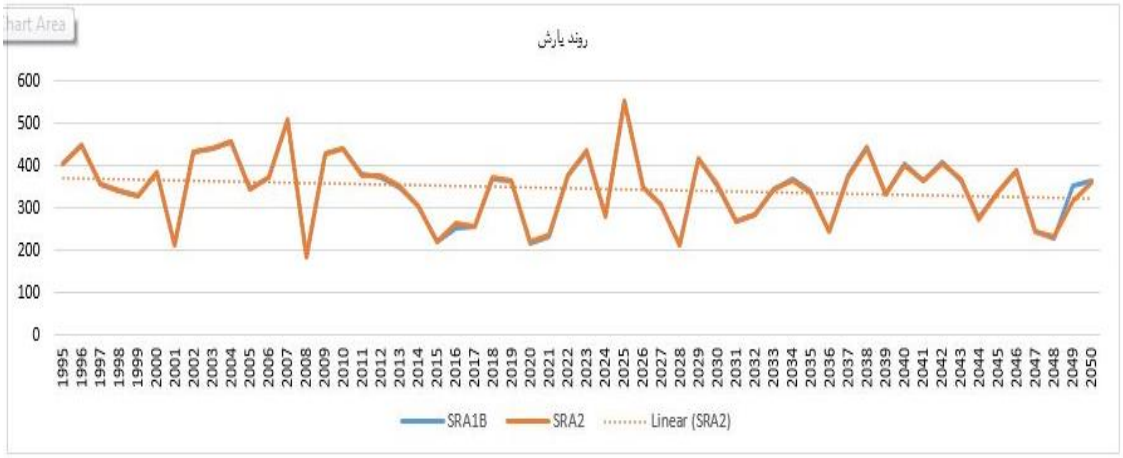


شکل ۴: شاخص SPI سالانه برای ایستگاه زنجان با مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

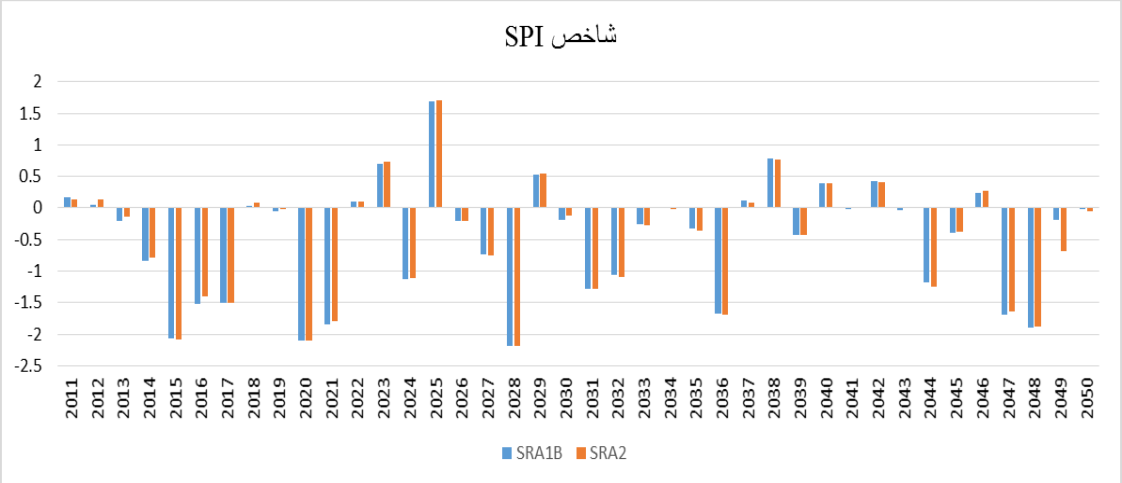


شکل ۵: شاخص PN سالانه برای ایستگاه زنجان با مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

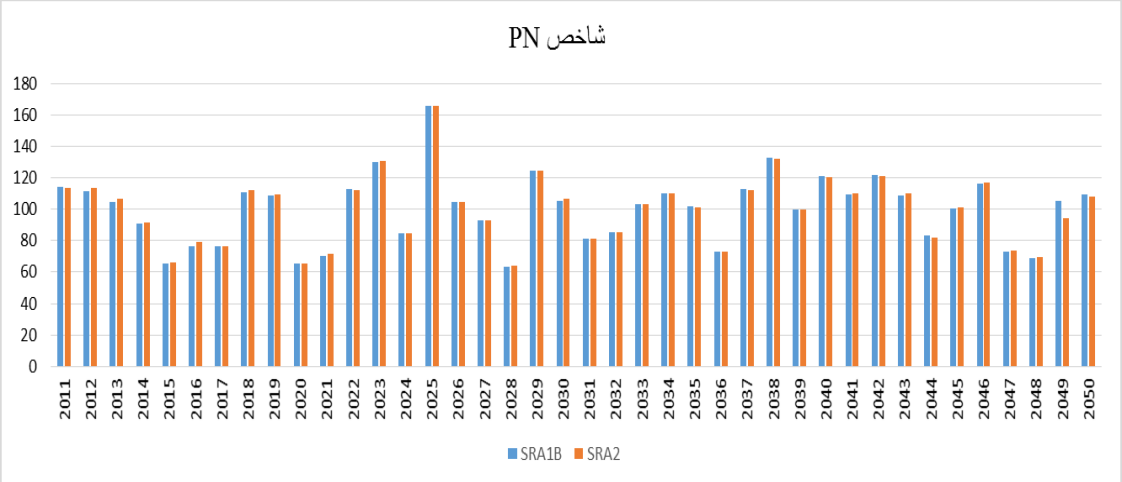
با توجه به شکل (۲) ایستگاه زنجان که مربوط به بارش بلندمدت و بارش‌های پیش‌بینی است، می‌توان چنین نتیجه گرفت که میانگین بارش این ایستگاه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰، ۲۹۳/۵ میلی‌متر بوده است و این مقدار بارش در طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ بر اساس مدل BCM2 و سناریوی SRAB1، ۲۹۱/۳ و بر اساس سناریوی SRB1، ۲۹۱/۴ میلی‌متر بوده است که این نشان‌دهنده‌ی کاهش بارش طی ۴۰ سال آینده در این ایستگاه است. بر اساس جداول(۸) و (۹) و نیز شکل‌های (۳) و (۴) که برای ایستگاه زنجان تهیه شده، بیانگر این مطلب است که بر اساس شاخص SPI و سناریوی SRAB1، در این ایستگاه ۲۷ سال بارش‌ها به‌صورت نرمال خواهد بود و ۵ سال در دوره‌ی آینده خشک‌سالی ملایم و ۴ سال خشک‌سالی متوسط و در سال‌های ۲۰۲۸ و ۲۰۴۳ بارش‌ها به‌شدت کاهش یافته و خشک‌سالی به‌شدت فوق‌العاده رخ خواهد داد و بر اساس این جداول، دو سال بارش‌ها از حالت نرمال بیش‌تر خواهد بود که در سال ۲۰۲۹ به‌صورت نسبتاً مرطوب و در سال ۲۰۳۸ به‌صورت بسیار مرطوب خواهد بود. بر اساس سناریوی SRB1 شرایط خشک‌سالی مانند سناریوی SRAB1 است، تنها از شدت خشک‌سالی شدید یک سال کاسته شده و به شرایط نسبتاً مرطوب یک سال افزوده شده است. بر اساس شاخص PN برای هر دو سناریو سال‌ها نرمال برای ایستگاه زنجان برابر با ۳۳ سال است و ۵ سال خشک‌سالی ضعیف و ۲ سال خشک‌سالی متوسط داریم که این شاخص نیز مانند شاخص SPI شرایط خشک‌سالی را ۷ سال بیان کرده است.



شکل ۶: روند بارش سالانه برای ایستگاه خدابنده از بدو تأسیس و پیش‌بینی شده با مدل HADGM - A1 تحت سناریو SRA1B و SRA2 تا سال ۲۰۵۰

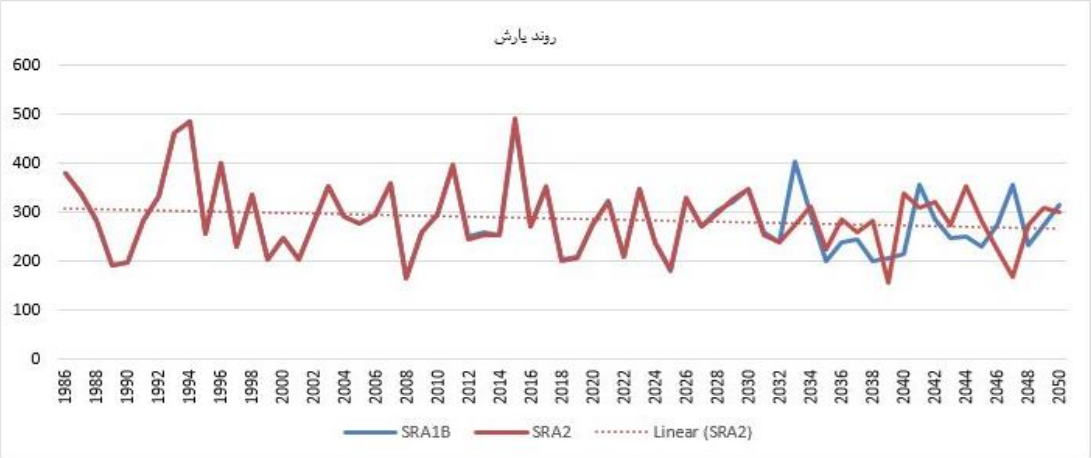


شکل ۷: شاخص SPI سالانه برای ایستگاه خدابنده با مدل HADGM - A1 تحت سناریو SRA1B و SRA2 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

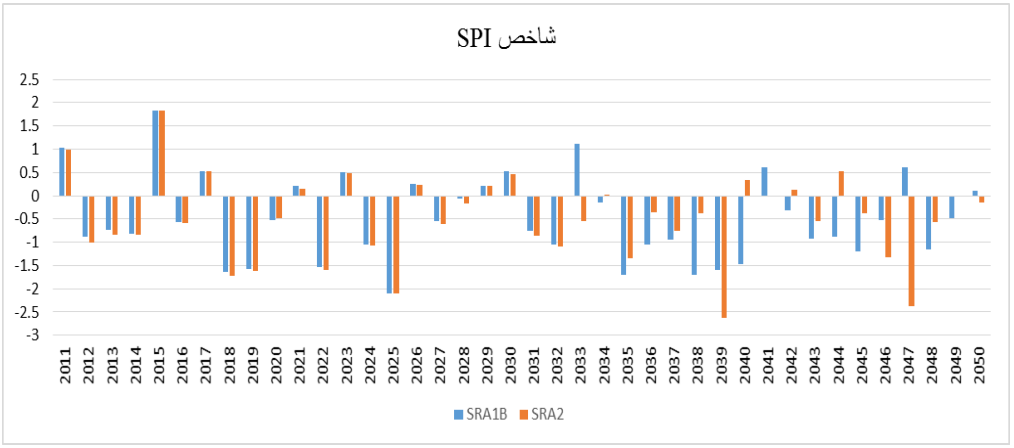


شکل ۸: شاخص PN سالانه برای ایستگاه خدابنده با مدل HADGM - A1 تحت سناریو SRA1B و SRA2 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

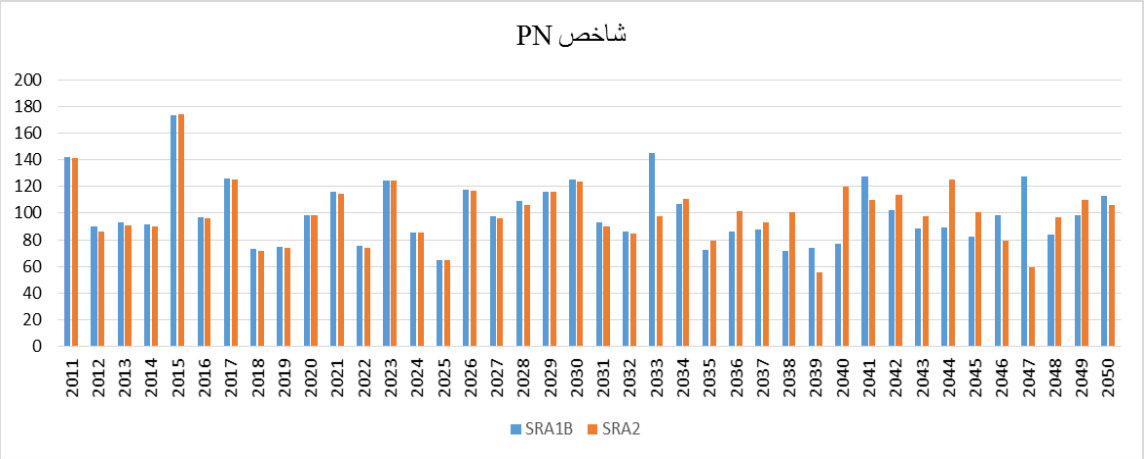
شکل (۵) نشان‌دهنده خط روند بارش ایستگاه خدابنده از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۵۰ است. این شکل نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۱۰ میانگین بارش ایستگاه خدابنده ۳۵۶/۹۷ میلی‌متر است و از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ مقدار بارش طبق مدل HADGM - A1 و بر اساس سناریوی SRA2 در این ایستگاه ۳/۵ میلی‌متر کاهش یافته و به ۳۳۳/۱ میلی‌متر رسیده است. بر اساس سناریوی SRA1B مقدار بارش در ایستگاه خدابنده به ۳۳۲/۵ میلی‌متر رسیده که نسبت به داده‌های در دسترس مقدار آن ۴ میلی‌متر کاهش یافته است. بر اساس جداول(۸) و (۹) و نیز شکل‌های(۶) و (۷) می‌توان مشاهده کرد که بر اساس خروجی هر دو سناریوی اقلیمی و بر اساس شاخص SPI برای ایستگاه خدابنده ۱۳ سال خشک‌سالی پیش‌بینی کرده است که شدیدترین آن ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۸ خواهد بود و در این ایستگاه بر اساس شاخص SPI، ۲۶ سال حالت نرمال دارد و تنها در سال ۲۰۲۵ وضعیت بارش از حد نرمال فراتر خواهد رفت و بارش در حد خیلی مرطوب قرار خواهد گرفت. بر اساس شاخص خشک‌سالی PN طی چهل سال آینده تنها ۹ سال بارش از حالت نرمال کم‌تر خواهد بود و شدیدترین خشک‌سالی به رتبه‌ی شدید برای چهار سال بر اساس خروجی سناریوی SRA2 برای سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۳۶ و ۲۰۴۷ خواهد بود. بر اساس سناریوی SRA1B، ۴ سال خشک‌سالی بر رتبه‌ی متوسط برای سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۲۰، ۲۰۲۸ و ۲۰۴۸ خواهد بود. با مقایسه‌ی دو مدل SPI و PN متوجه می‌شویم که سال‌های خشک‌سالی تعیین‌شده با سناریوی SRA1B با دو سناریوی مدل SPI هم‌خوانی بیش‌تری دارد.



شکل ۹: روند بارش سالانه برای ایستگاه خرمدره از بدو تأسیس و پیش‌بینی شده با مدل HADGM - A1 تحت سناریو SRA1B و SRA2 تا سال ۲۰۵۰

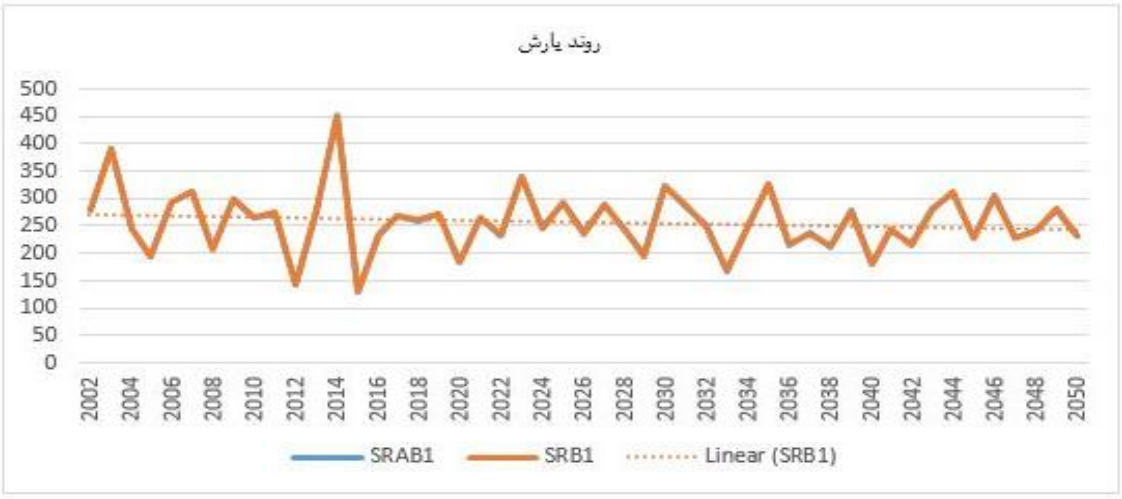


شکل ۱۰: شاخص SPI سالانه برای ایستگاه خرمدره با مدل HADGM - A1 تحت سناریو SRA1B و SRA2 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

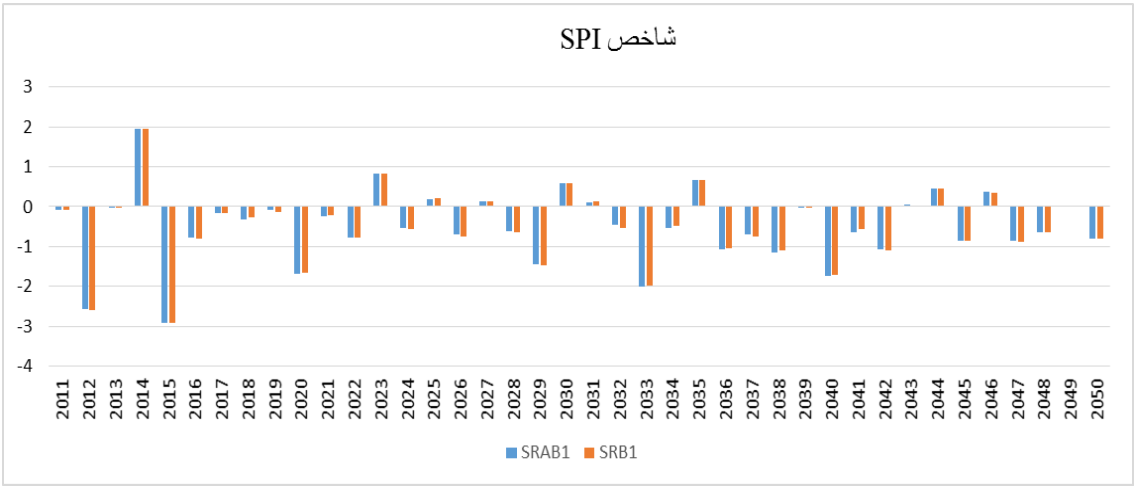


شکل ۱۱: شاخص PN سالانه برای ایستگاه خرمدره با مدل HADGM - A1 تحت سناریو SRA1B و SRA2 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

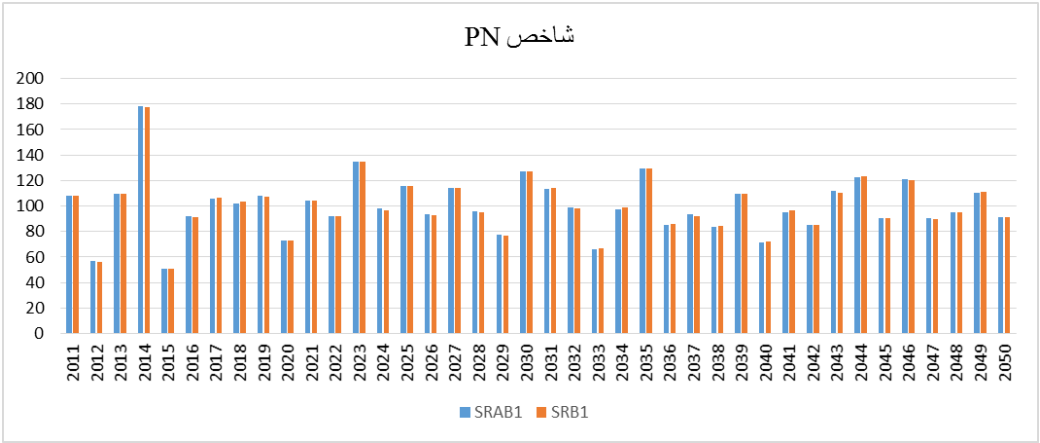
بر اساس شکل (۸) که روند بارش ایستگاه خرمدره را طی سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۵۰ نشان می‌دهد می‌توان مشاهده کرد که از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۰ میانگین بارش ۲۹۸/۳ میلی‌متر بوده که این میانگین طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ بر اساس مدل اقلیمی HADGM - A1 تحت دو سناریوی SRA1B و SRA2 به ترتیب ۲۷۸/۱ و ۲۸۰/۹ بوده که کاهش ۱۰ و ۸ میلی‌متری را بر اساس خروجی این دو سناریوی اقلیمی نشان می‌دهد. جداول (۱۱) و (۱۲) و شکل‌های (۹) و (۱۰) بیانگر این مطلب است که این ایستگاه بر اساس خروجی سناریوی SRA1B طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ شاهد ۱۴ سال خشک‌سالی خواهد بود که شدیدترین آن‌ها به مدت‌زمان ۲ سال طی سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۲۵ خواهد بود و ۱۲ سال خشک‌سالی دیگر در حد ضعیف و متوسط است که هر کدام به مدت ۶ سال خواهد بود. طی ۴۰ سال آینده بر اساس این سناریو تنها ۳ سال بارش‌ها بیش‌تر از نرمال خواهد بود که طی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۳۳ به‌صورت نسبتاً مرطوب و در سال ۲۰۱۵ به‌صورت خیلی مرطوب خواهد بود و ۲۳ سال نرمال خواهد داشت. بر اساس سناریوی SRA2 تعداد خشک‌سالی‌ها ۱۱ سال خواهد بود که ۳ سال ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ خشک‌سالی به رتبه‌ی شدید خواهد بود و از ۸ سال خشک‌سالی دیگر ۵ سال در حد ضعیف و ۳ سال متوسط خواهد بود. بر اساس این سناریو تنها ۱ سال آن هم در سال ۲۰۱۵ شاخص بارش مرطوب خواهد بود و ۲۸ سال نیز در حالت نرمال خواهد ماند. بر اساس شاخص خشک‌سالی PN تحت خروجی سناریوی SRA1B طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ حدود ۷ سال شرایط خشک‌سالی حاکم خواهد بود که ۶ سال آن خشک‌سالی ضعیف و ۱ سال آن خشک‌سالی متوسط خواهد بود و ۳۳ سال شرایط نرمال برای سال‌های آینده پیش‌بینی می‌شود. بر اساس سناریوی اقلیمی SRA2 تعداد سال‌های خشک برای ۴۰ سال آینده ۸ سال خواهد بود که ۵ سال آن خشک‌سالی ضعیف و ۳ سال آن خشک‌سالی متوسط خواهد بود و ۳۲ سال هم حالت نرمال خواهد داشت.



شکل ۱۲: روند بارش سالانه برای ایستگاه ماهنشان از بدو تأسیس و پیش‌بینی شده با مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 تا سال ۲۰۵۰



شکل ۱۳: شاخص SPI سالانه برای ایستگاه ماهنشان با مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰



شکل ۱۴: شاخص SPI سالانه برای ایستگاه ماهنشان با مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 از سال ۲۰۱۱ تا سال ۲۰۵۰

با توجه به شکل (۱۱) می‌توان مشاهده کرد که میانگین بارش ایستگاه ماه‌نشان از طی دوره‌ی آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۰ از ۲۷۷/۳ میلی‌متر به ۲۵۲/۹ میلی‌متر طبق مدل BCM2 تحت سناریو SRAB1 و SRB1 کاهش یافته که این امر بیانگر کاهش حدود ۲۴/۳ میلی‌متری در این ایستگاه را نشان می‌دهد. جداول (۱۱) و (۱۲) و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) بیانگر این مطلب است که شاخص SPI بر اساس خروجی مدل BCM2 و تحت سناریوی SRAB1 برای ۴۰ سال آتی، ۹ سال خشک‌سالی پیش‌بینی می‌کند که سه سال آن خشک‌سالی متوسط و ۶ سال آن خشک‌سالی ضعیف است. بر اساس این سناریو تنها یک سال آن‌هم سال ۲۰۱۴ شرایط بارش خیلی مرطوب است و ۳۰ سال آن نزدیک به نرمال است. بر اساس سناریوی SRB1 تعداد سال‌های خشک مانند سناریوی SRAB1 ۹ سال است ولی شدت آن افزایش یافته است؛ به‌طوری‌که در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ شاخص خشک‌سالی به فوق‌العاده خشک رسیده است. در این سناریو نیز سال مرطوب مربوط به سال ۲۰۱۴ است و ۳۰ سال حالت نزدیک به نرمال خواهد بود. بر اساس شاخص PN بر اساس سناریوی SRAB1 از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۵۰ تنها ۶ سال خشک‌سالی رخ خواهد داد که سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ خشک‌سالی شدید و سال‌های ۲۰۲۹،۲۰۲۰، ۲۰۳۳ و ۲۰۴۰ خشک‌سالی متوسط رخ خواهد داد و ۳۴ سال آینده حالت نرمال خواهد داشت. بر اساس سناریوی SRB1 تنها یک سال خشک‌سالی شدید خواهیم داشت و آن هم ۲۰۱۵ و در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۳۳ شدت خشک‌سالی متوسط خواهد بود و ۳ سال خشک‌سالی ضعیف در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۲۹ و ۲۰۴۰ رخ خواهد داد و بر اساس این سناریو ۳۴ سال نیز در این دوره حالت نرمال خواهد داشت. با مقایسه‌ی شاخص NP و SPI متوجه می‌شویم که در هر دو شاخص سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ خشک‌سالی شدیدی رخ خواهد داد.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی استان زنجان طی۴۰ سال آینده (۲۰۱۱ - ۲۰۵۰) با استفاده از شاخص استانداردشده‌ی (SPI) و شاخص درصد بارندگی (PN) صورت گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان مشاهده کرد که مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دارای توانایی بالایی است و بیش‌ترین خطا در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مربوط به پارامتر بارش است. هم‌چنین این نتایج بیانگر آن است که با افزایش آمار ورودی به مدل میزان خطا کاهش پیدا می‌کند که این را با مقایسه‌ی دو ایستگاه زنجان و ماه‌نشان می‌توان به‌درستی مشاهده کرد. بررسی نتایج تغییرات پارامتر اقلیمی بارش طی ۴۰ سال پیش‌بینی نسبت به دوره‌ی پایه، حاکی از آن است که میانگین بارش رو به کاهش است؛ به‌طوری‌که کم ترین کاهش برای ایستگاه زنجان با ۲ میلی‌متر و بیش‌ترین کاهش برای ایستگاه خدابنده و ماه‌نشان با ۲۴ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. سپس با کمک داده‌های بارش شبیه‌سازی شده، شاخص استانداردشده‌ی (SPI) و شاخص درصد بارندگی (PN) در مقیاس زمانی سالانه برای ارزیابی خشک‌سالی طی دو دهه‌ی آتی محاسبه شدند. نتایج حاصل، هم‌خوانی این دو شاخص را نشان می‌دهد که البته به دلیل گسترده بودن طبقه‌بندی شاخص SPI و تفکیک بیش‌تر آن، تفاوت‌های ناشی از محدوده‌های طبقه‌بندی دو شاخص نمایان گردید. با بررسی دوره‌های خشک‌سالی قابل‌مشاهده است که فراوانی خشک‌سالی‌ها بیش‌تر در بیست سال اول است و با گذشت زمان از شدت خشک‌سالی‌ها کاسته شده و وضعیت میل به سمت نرمال شدن دارد.

نتایج حاصل از تحقیقات ریپندرا اوول[12] و همکاران(۲۰۱۶) در منطقه‌ی تگزاس آمریکا، بحری و همکاران(۱۳۹۳) در استان اصفهان، ساری صراف و همکاران(۱۳۹۴) در شهرستان تبریز و پورمحمدی و همکاران(۱۳۹۶) در استان همدان حاکی از کاهش بارش و افزایش دمای حداقل و حداکثر است که نتایج ایشان با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

تحلیل خشک‌سالی‌های استان زنجان نشان می‌دهد که پدیده خشک‌سالی در استان از فراوانی نسبی بالایی برخوردار است(میانگین ایستگاه‌ها ۱۲ سال) که بیشتر خشک‌سالی در رتبه متوسط و ضعیف قرار دارند و تنها ۲ تا ۳ مورد آن خشک‌سالی شدید است.

12- Ripendra Awal

۷- منابع

۱. بابائیان، نجفی نیک، ایمان، زهرا (۱۳۸۸). مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره‌ی ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹، ۱۳۸۸، پروژه‌ی خاتمه‌یافته‌ی پژوهشکده‌ی اقلیم‌شناسی مشهد.

۲. بحری، معصومه، دستورانی، محمدتقی، گودرزی، مسعود (۱۳۹۴). بررسی خشک‌سالی‌های دهه‌ی ۲۰۳۰ – ۲۰۱۱ تحت اثر تغیر اقلیم، مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز اسکندری، استان اصفهان، نشریه‌ی علمی - پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد ۷، شماره‌ی ۲، صص ۱۷۱- ۱۵۷.

۳. پورعلی حسین، سیده شیما، مساح بورانی، علیرضا (۱۳۹۴). پیش‌بینی خشک‌سالی استان آذربایجان شرقی در دوره‌ی ۲۰۲۲ – ۲۰۱۳ میلادی، جغرافیا و توسعه، شماره‌ی ۳۸، صص ۲۰۷-۱۸۹.

۴. پورمحمدی، سمانه، دستورانی، محمدتقی، مساح بورانی، علیرضا، گودرزی، مسعود، جعفری، هادی، رحیمیان، محمدحسین (۱۳۹۶). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه‌ی راه‌کارهای سازگاری با اثرات آن(مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز تویسرکان همدان)، نشریه‌ی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۱، شماره‌ی ۳۷، صص ۱۳-۱.

۵. خلیقی سیگارودی، شهرام، صالح پورجم، امین، تاجیک، مریم، فتاحی اردکانی، محمدعلی (۱۳۹۱). هواشناسی در آبخیزداری، جلد اول، چاپ اول، تهران، انتشارات زانیس.

۶. رسولی، علی‌اکبر، رضا بنفشه، مجید، مساح بورانی، علی‌اکبر (۱۳۹۳). بررسی اثر عوامل مورفو - اقلیم بر دقت ریزمقیاس گردانی مدل LARS- WG، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۸، شماره‌ی ۲۴، صص ۱۸-۹.

۷. روشن، غلامرضا، نجفی، محمد سعید (۱۳۹۰). بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های آینده‌ی کشور با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال ۲، شماره‌ی ۶، صص ۱۰۷ – ۸۷.

۸. زیرک‌زاده، سحر، بذرافشان، جواد (۱۳۹۲). تحلیل زمانی - مکانی شدت خشک‌سالی در دوره‌ی آتی تحت تأثیر اقلیم با استفاده از مدل (CGCM3) در استان اصفهان، مجله‌ی علمی فنی نیلوا، شماره‌ی ۸۲ - ۸۳، صص ۷۲-۵۹.

۹. ساری صراف، بهروز، محمودی، ق سعید، زنگنه، سعید، پاشایی، زهرا (۱۳۹۴). پایش و پیش‌بینی ترسالی و خشک‌سالی تبریز با استفاده از مدل CLIMGEN و شاخص SPI، نشریه‌ی هیدروئومورفولوژی، شماره‌ی ۲، صص ۷۸ – ۶۱.

۱۰. صفدری، علی‌اکبر، محسنی ساروی، محسن، ثقفیان، بهرام، مهدوی، محمد (۱۳۸۲). پهنه‌بندی فراوانی خشک‌سالی‌های حوضه-ی کارون به کمک شاخص بارش استاندارد(SPI) در محیط GIS، اصفهان: سومین کنفرانس منطقه‌ای و اولین کنفرانس ملی تغییر اقلیم.

۱۱. طائی سمیرمی، سیاوش، مرادی، حمیدرضا، خداقلی، مرتضی (۱۳۹۳). شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی از متغیرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM و مدل‌های گردش عمومی جو(مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز بار نیشابور)، فصلنامه‌ی انسان و محیط زیست، شماره‌ی ۲۸، صص ۱۶-۱.

۱۲. عباسی، فاطمه، ملبوسی، شراره، بابائیان، ایمان، اثمری، مرتضی، برهانی، رضا (۱۳۸۹). پیش‌بینی تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی در دوره‌ی ۲۰۳۹ – ۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G، نشریه آب‌وخاک، جلد ۲۴، شماره‌ی ۲، صص ۲۳۳- ۲۱۸.

۱۳. علیجانی، بهلول، بابایی، ام‌السلمه (۱۳۸۸). تحلیلی فضایی خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی منطقه‌ای، صص ۱۲۱-۱۰۹.

۱۴. قربانی، خلیل، خلیلی، علی، علوی پناه، سید کاظم، نخعی‌زاده، غلامرضا (۱۳۸۹). مطالعه‌ی تطبیقی نمایه‌های هواشناسی خشک‌سالی SPI, AIAP به روش داده‌کاوی (مطالعه‌ی موردی: استان کرمانشاه)، نشریه آب‌وخاک، جلد ۲۴، شماره‌ی ۳، صص ۴۲۶- ۴۱۷.

۱۵. گل محمدی، مریم، مساحی بوانی، علیرضا (۱۳۸۹). بررسی تغییرات شدت و دوره‌ی بازگشت خشک‌سالی حوضه قره‌سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه‌ی آب‌وخاک، شماره‌ی ۲، صص ۳۱۵ – ۳۲۶.

۱۶. محمدلو، محمد، حقی زاده، علی، زینی وند، حسین، کرمی، حمید (۱۳۹۳). پیش‌بینی خشک‌سالی‌های اقلیمی دوره‌ی آتی، مطالعه‌ی موردی: شهرستان‌های ارومیه و خوی، فصلنامه‌ی بین‌المللی پژوهشی تحلیل منابع آب و توسعه، سال ۲، شماره‌ی ۴، صص ۹۳-۸۰.

۱۷. مظفری، غلامعلی، شفیعی، شهاب، تقی زاده، زهرا (۱۳۹۴). ارزیابی شرایط خشک‌سالی در استان سیستان و بلوچستان طی(۱۴۱۰-۱۳۹۱) را با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو، فصلنامه‌ی علمی، پژوهشی اطلاعات جغرافیا، دوره‌ی ۲۴، شماره‌ی ۹۳، صص ۱۱۴–۱۰۱.

۱۸. معافی معدنی، سیده‌فاطمه، موسوی بایگی، محمد، انصاری، حسین (۱۳۹۱). پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی استان خراسان رضوی طی دوره‌ی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری خروجی مدل LARS –WG5، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره‌ی ۳، صص ۳۷-۲۱.

19. Awal, R., Bayabil, H. K., & Fares, A. (2016). Analysis of potential future climate and climate Extremes in the Brazos Headwaters basin, Texas. Water, 8(12), pp. 1–18.
20. Blenkinsop, Stephen, Fowler, Hayley J. (2007). Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. Journal of Hydrology, Volume 342, Issue 1, pp 50–71.
21. Burke, Edmund J, Brown, Stewart J, Christidis, Nikolaos (2006). Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre Climate Model. Journal of Hydrometeorology. Volume 7, pp 1113-1125.
22. Dai, Aiguo (2010). Drought under global warming: a review. Climate Change, Volume 2, pp 45- 65.
23. Dubrovsky, Martin, Svoboda, Mark D, Trnka, Miroslav, Hayes, Martin J, Wilhite, Donald A, Zalud, Zarudlý, Hlavinka, Petr (2009). Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions. Theoretical Applied Climatology, Volume 96, Issue 1-2, pp 155–171.
24. Edwars, Daniel C, Mckee, Thomas B (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. Climatology drought in the United States at multiple Time Scales. Climatology Report, Issue 97, part2, 1-174.
25. Li, Yinpeng, Wei P, Ye, Wang, Meng, Yan, Xiaodong (2009). Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. Climate. Research, Volume 39, number 1, pp 31-46.
26. Loukas, Alex, Vasiliades, Lampros, Tzabiras, John (2008). Climate change effects on drought severity, Adv. Geosci, Volume 17, pp 23-29.
27. Mullan, Brett A, Porteous, Alan, Wratt, David, Hollis, Michele. (2005). Changes in drought risk with climate change, NIWA Client Report: WLG2005-23, NIWA Project: MFE05305, Prepared for Ministry for the Environment (NZ Climate Change Office) Ministry of Agriculture and Forestry.
28. Sousa, Paulo M, Trigo, Ricardo M, Aizpurua, Patrick, Nieto, Mikel R, Gimeno, Luis, Garcia-Herrera, Ricardo (2011). Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean. Natural Hazards and Earth System Sciences, Volume 11, pp. 33–51.
29. Tseng, Hung-Wei, Yang, Tse-Chuan, Kuo, CM, Yu, Philip S (2012) Application of Multi-Site Weather Generators for Investigating Wet and Dry Spell Lengths under Climate Change: A Case Study in Southern Taiwan. Journal of Water Resources Management, Volume 26, Issue 15, pp 4311-4326.