

بررسی پتانسیل اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده کشور با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو

غلامرضا روشن، استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان
محمد سعید نجفی*، دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

چکیده

امروزه با برهم خوردن تعادل سیستماتیک سامانه‌ی اقلیم، بروز آشفتگی‌ها و ناهنجاری‌های رفتاری در اقلیم تشدید یافته است؛ از جمله بروز و تشدید این رخداد‌های حدی، افزایش خشکسالی‌هاست. از آن‌جا که کشور ایران به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی خود، در مواجهه با این ناهنجاری‌های اقلیمی به شدت آسیب‌پذیر است. در این تحقیق به ارزیابی و شبیه‌سازی اثر گرمایش جهانی بر خشکسالی‌های آینده‌ی کشور پرداخته شده است. بدین منظور جهت شبیه‌سازی مؤلفه‌ی اقلیمی بارش، از ترکیب دو مدل گردش عمومی جو *GISS-EH* و *CNRM-CM3* استفاده گردید. اما جهت معرفی سناریوی مناسب، ۱۸ سناریو انتخاب و از میان آن‌ها، سناریوی *p50* که با شرایط انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران انطباق مناسب‌تری دارد پیشنهاد گردید. به‌علاوه بر این جهت ارزیابی خشکسالی‌های ایران با استفاده از شاخص بارش استاندارد (*SPI*) در دو مقیاس زمانی گذشته تا حال (۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵) و برای دهه‌های آینده، سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ مورد توجه واقع گردید. آنچه داده‌های تجربی و فصلی برای سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ نشان می‌دهند، وجود فراوانی رخداد خشکسالی‌ها در بین ۴۳ ناحیه‌ی مطالعاتی کشور، ابتدا برای فصل زمستان، سپس بهار و در نهایت پاییز است، که این برای داده‌های شبیه‌سازی شده تقریباً عکس می‌باشد؛ زیرا با رخداد گرمایش جهانی بیش‌ترین ریسک رخداد خشکسالی به ترتیب برای فصول بهار، پاییز و زمستان شبیه‌سازی شد. اما خروجی‌های شبیه‌سازی شده بارش نشان می‌دهند که با توجه به میانگین سالانه و درازمدت (۱۹۶۱-۱۹۹۰)، تمام دوره‌های شبیه‌سازی شده از افزایش بارش نسبت به این میانگین درازمدت برخوردار خواهند گردید. به‌گونه‌ای که انتظار می‌رود مقادیر شبیه‌سازی شده بارش برای سال ۲۱۰۰ به میزان ۸۸ میلی‌متر نسبت به میانگین درازمدت افزایش خواهد یافت. خروجی‌های شبیه‌سازی برای خشکسالی‌ها، در دهه‌های آینده نشان می‌دهند که این نواحی غرب خزر و گیلان، به‌همراه 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 شبیه‌سازی شده برخوردار می‌باشند.

واژگان کلیدی

مدل‌های گردش عمومی جو، سناریوهای انتشار، گازهای گلخانه‌ای، ناهنجاری‌ها، خشکسالی.

۱- مقدمه

بررسی روند داده‌های آب و هوایی ثبت شده در دهه‌های گذشته، مطالعات دیرینه‌شناسی و نتایج خروجی تمامی مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی‌کننده اقلیم، نشان دهنده‌ی بروز تغییرات غیر قابل اغماض در اقلیم جهانی است. بدون شک این تغییرات حاصل تأثیر منفی فعالیت‌های انسانی بوده که ازدیاد گازهای گلخانه‌ای را بدنبال داشته است. مشخصاً بروز و تشدید پدیده‌های حدی مانند طوفان‌های سهمگین، یخبندان‌های ناهنگام، خشک‌سالی‌ها و موارد مشابه، نتیجه‌ی چنین تغییراتی است که ما را در برخورد با تهدیدی جهانی به یقین رسانده است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۹: ۷۰).

یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌هایی که از روند تغییرات دمایی تأثیر می‌پذیرد، بارش است (قویدل رحیمی، ۱۳۸۹: ۶۷)، بنابراین با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران و قرار گرفتن آن در کمربند خشک و نیمه خشک جهان، با رخداد گرمایش جهانی، احتمال وقوع و تشدید خشک‌سالی‌ها افزایش خواهد یافت. اهمیت موضوع خشک‌سالی برای کشوری شبیه ایران که دسترسی به دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و منابع آبی به‌عنوان مشکلی بزرگ برای آن قلمداد می‌شود، باعث گردیده تا محققان به شیوه‌های مختلف به مطالعه و ارزیابی پدیده خشک‌سالی بپردازند. به‌عنوان مثال در زمینه پایش خشک‌سالی‌ها با استفاده از تکنیک‌های آماری و سنجش از دوری می‌توان به مطالعات شمسی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور به ردیابی و تحلیل اثر خشک‌سالی‌ها در منطقه‌ی کاشان پرداختند و نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های گیاهی برای ردیابی خشک‌سالی‌ها در مناطق بیابانی مناسب‌تر است. مرادی و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی و پیش‌بینی شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها با استفاده از شاخص *SPI* و زنجیره مارکوف در استان فارس پرداخته و نتایج نشان می‌دهد که بیش‌ترین شدت خشک‌سالی‌ها در جنوب و مرکز فارس و کمترین حساسیت نسبت به خشک‌سالی نیز در شمال فارس رخ داده است. از سوی دیگر بیش‌ترین مدت و تداوم خشک‌سالی‌ها نیز در جنوب منطقه فارس است. در رابطه با خشک‌سالی‌ها می‌توان به مطالعات دیگری هم‌چون تعیین و بررسی دوره‌های خشک و تر با استفاده از تکنیک‌های دیرینه‌شناسی اشاره کرد، مانند مطالعات کارل^۱ و همکاران (۲۰۰۷)، برای مناطق جنوب حاره در آمریکا و پاشو^۲ و همکاران (۲۰۱۱) برای شمال شرق اسپانیا.

اما بر هم خوردن تعادل سیستماتیک سامانه‌ی اقلیم و بروز آشفتگی‌ها و ناهنجاری‌های رفتاری در اقلیم جهانی و پیدایش و گسترش مدل‌های اقلیم جهانی (*GCM*) و منطقه‌ای (*RCM*)، سبب ترغیب محققان جهت شبیه‌سازی الگوی رفتاری دما و خشک‌سالی‌ها در آینده، با رویکرد استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو شده است. امروزه این مدل‌ها ابزار اصلی بررسی تغییرات اقلیمی در کره زمین محسوب می‌شوند. به‌عنوان مثال خورشید دوست و قویدل رحیمی (۱۳۸۵) و صلاحی و همکاران (۱۳۸۶) به ترتیب با استفاده از مدل *GFDL* و مدل *GISS* به شبیه‌سازی وضعیت اقلیمی تبریز در شرایط دو برابر شدن میزان *CO2* پرداختند و نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش دما و به تبع آن کاهش شدت و مدت دوره سرد، کاهش بارش بهاره و زمستانه و طولانی‌تر شدن دوره‌ی رشد گیاهان است. هم‌چنین قویدل رحیمی (۱۳۸۹) در مطالعه‌ی دیگر با استفاده از تکنیک‌های آماری به ارزیابی اثر گرمایش جهانی بر بارش سالانه‌ی جلفا پرداخت و نتایج حاکی از آن است که با افزایش روند ناهنجاری‌ها در کره زمین، متوسط بارش سالانه جلفا نیز کاهش یافته است. گل‌محمدی و مساح (۱۳۸۹) با استفاده از مدل *HadCM-3* و سناریو خانواده *A2* و شاخص *SPI*، به ارزیابی اثرات گرمایش جهانی در خشک‌سالی‌های حوضه‌ی قره‌سو برای سال‌های ۲۰۴۰ - ۲۰۶۹ پرداخته و نتایج نشان می‌دهد که در بستر تغییر اقلیم، میزان بارش در منطقه افزایش و به تبع آن شدت خشک‌سالی‌ها کاهش خواهد یافت. فولر^۳ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل‌های

^۱ - Karl^۲ - Pasho^۳ - Fowler

گردش عمومی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی و سناریوی A2، به بررسی شدت، مدت و تکرار خشک‌سالی‌ها در انگلستان پرداخته و نتایج حاکی از آن است که میانگین بارش در فصل زمستان افزایش و در فصل تابستان کاهش و به‌طور کلی شدت و تداوم خشک‌سالی‌ها کاهش خواهد یافت. شفیلد و وود (۲۰۰۸) بمنظور پیش بینی خشک‌سالی‌ها در آینده، براساس مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار A2, AIB, BI داده‌های رطوبت خاک را شبیه‌سازی کردند. خروجی مدل‌ها نشان می‌دهد که در دوره‌های ۴ تا ۶ ماهه میزان رطوبت خاک از میانه‌های قرن ۲۰ م. تا اواخر قرن ۲۱ م. رو به کاهش بوده و اگر در مناطقی بارش افزایش پیدا کند، درعین حال میزان تبخیر نیز افزایش پیدا خواهد کرد، که حاصل آن افزایش خشک‌سالی‌ها است. هدف از این مطالعه ابتدا ارزیابی سناریوهای انتشار می‌باشد تا بر آن اساس بتوان سناریویی که تناسب بیش تری از لحاظ انتشار گازهای گلخانه‌ای در ایران دارد را انتخاب نمود تا نتایج شبیه‌سازی شده به واقعیت نزدیک‌تر شوند، سپس شبیه‌سازی خشک‌سالی‌های آینده با استفاده از سناریوی انتشار مناسب، انجام خواهد شد.

۲ - مواد و روش‌ها

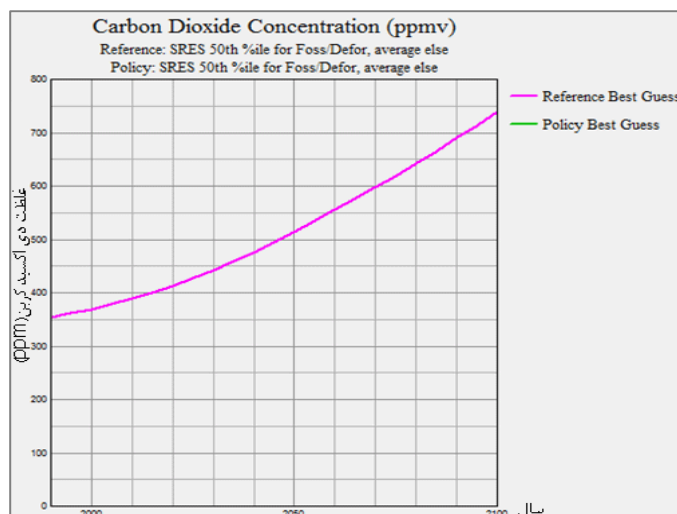
۱-۲ - توصیف مدل MAGICC SCENGEN و مدل‌های GCM منتخب

در تحقیق حاضر، به منظور پیش بینی و مدلسازی تغییرات بارش در اثر افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از مدل ترکیبی^۱ SCENGEN^۲ MAGICC^۳ استفاده می‌شود. در مدل مذکور پارامتر بارش تا سال ۲۰۰۰ تعریف شده است، بنابراین استفاده از داده‌های این پارامتر برای سال‌های بعد از ۲۰۰۰ دچار محدودیت بوده و قابل استفاده نمی‌باشد، لذا داده‌های پایه تا سال ۲۰۰۰ منظور می‌گردد (روشن و همکاران، ۲۰۱۰: ۵۷۴). مدل MAGICC، متوسط سالانه دمای هوای سطح زمین و متوسط سالانه‌ی دمای سطح دریا را از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و دی اکسید گوگرد محاسبه می‌کند (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۲۷). این بخش شامل مجموعه‌ای از داده‌های اقلیمی مشاهداتی و خروجی مدل‌های گردش عمومی جو است که به کاربر امکان بررسی و ارزیابی ابعاد مختلف عدم قطعیت درباره اقلیم آینده را می‌دهد. در حقیقت این بخش شامل مجموعه‌ای از مدل‌های جفت شده مختلف است که در یک بسته نرم افزاری با یکدیگر تلفیق شده‌اند. این نرم‌افزار به کاربر امکان می‌دهد که تغییرات در غلظت دی اکسید کربن جو، دمای متوسط سطح زمین و دریا، بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ را با استفاده از سناریوهای انتشار دی اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن، هالوکربن‌ها و دی اکسید سولفور، تعیین کند (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۵، وایگلی و همکاران، ۱۹۹۳: ۴۱۳، ۱۹۹۴: ۲۰۰، ۲۰۰۰: SCENGEN.۷). نیز یک تولیدکننده‌ی داده‌های سناریوهای جهانی و منطقه‌ای است. این مدل علاوه بر این که یک مدل اقلیمی است، یک پایگاه داده ساده نیز می‌باشد که حاوی نتایج تعداد زیادی از مدل‌های GCM و مجموعه‌ای از داده‌های مشاهده‌ای جهانی و منطقه‌ای است. به‌علاوه این مدل مجموعه از داده‌های اقلیم منطقه‌ای در اروپا، جنوب آسیا، آمریکا و آفریقای جنوبی را در بر می‌گیرد. در واقع، SCENGEN یک نرم‌افزار ساده است که به کاربر اجازه می‌دهد تا از نتایج مدل MAGICC و مدل‌های GCM استفاده نماید. هم‌چنین این امکان را فراهم می‌سازد تا محقق به وسیله فرض‌های مختلف در مورد پارامترهای سیستم اقلیم، پیامدها را بازشناسد. سناریوهای این مدل، در واقع از انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده با استفاده از فرض‌های مختلف در زمینه فعالیت‌های انسانی، سیاست‌ها، کاربردهای فناوری و غیره پیش بینی می‌شوند. باین روش می‌توان از ۲۰ مدل GCM به صورت منفرد، چندتایی و یا از همه آن‌ها استفاده نمود. در صورت انتخاب چند مدل GCM، برنامه از آن‌ها میانگین‌گیری نموده و یک الگوی ترکیبی از تغییر اقلیم را ایجاد خواهد کرد (محمدی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۲۸، روشن و همکاران ۲۰۱۱: ۱۴۲).

^۱ - Sheffield & wood

^۲ - Scenario Generator

^۳ - Model for Assessment of Greenhouse- Gas induced Climate Chang.



شکل ۱. نحوه انتشار دی اکسید کربن به‌وسیله سناریوی بدبینانه P50

در تحقیق حاضر، جهت شبیه‌سازی شرایط تغییر اقلیم آینده، مقادیر بارش از نتایج ترکیبی مدل گردش عمومی جو *GISS-EH* و *CNRM-CM3* استفاده شده است. مدل *GISS-EH* توسط مؤسسه مطالعات فضایی گودارد^۱ وابسته به ناسا در ایالات متحده طراحی شده است و شامل مؤلفه‌های جوی و اقیانوسی است. مؤلفه‌های جوی که توسط این مدل قابل پیش‌بینی هستند شامل دمای پتانسیل، نم و یژه و مجموع آب متراکم شده است. مؤلفه‌های اقیانوسی این مدل نیز شامل محتوای گرمایی^۲ پتانسیل، غلظت نمک و سرعت گردش آب می‌باشد. قدرت تفکیک جوی این مدل $(4^{\circ} \text{Lat}) \times (5^{\circ} \text{Lon})$ بوده و در ۲۰ سطح، و قدرت تفکیک اقیانوسی آن نیز $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ و در ۱۶ سطح است. مدل *CNRM-CM3* نیز توسط مرکز ملی مطالعات جوی فرانسه، در دو مؤلفه‌ی جوی و اقیانوسی طراحی شده است. مؤلفه‌های جوی آن شامل دما، مؤلفه‌ی باد شمال سو و شرق سو، نم و یژه، غلظت ازن و فشار است. مؤلفه‌های اقیانوسی نیز شامل درجه‌ی حرارت، شوری، سرعت تلاطم قائم منطقه‌ای و سرعت مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری است. قدرت تفکیک جوی مدل $1/9^{\circ} \times 1/9^{\circ}$ بوده و در ۴۵ سطح است. همچنین قدرت تفکیک اقیانوسی آن برای دو منطقه استوا و قطب‌ها متفاوت است، در استوا $(2^{\circ} \text{Lat}) \times (5^{\circ} \text{Lon})$ و در قطب‌ها $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ است. تعداد سطوح آن در اقیانوس‌ها ۳۱ بوده که در شبکه‌های 182×152 طبقه بندی شده اند.

دلایل استفاده از نتایج ترکیبی مدل‌های مذکور آن است که مدل *CNRM-CM3* زمانی که مقادیر بارش‌ها در کشور افزایشی بوده، مقدار بارش را بهتر شبیه‌سازی کرده و در شبیه‌سازی مقادیر کاهش‌ی ضعف داشته است. از سوی دیگر مدل *GISS-EH* مقادیر کاهش‌ی بارش را در کشور، بهتر از زمانی که مقادیر افزایشی بوده است، شبیه‌سازی می‌کند. بنابراین از نتایج ترکیبی این دو مدل استفاده گردید. هم‌چنین برای این شبیه‌سازی‌ها از سناریوی واحد به‌نام *P50* که متوسط سناریوی^۳ *SRES* یا سناریوهای انتشار می‌باشد، استفاده شده است (شکل ۱). از آن‌جا که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی است و از طرفی تعیین میزان انتشار این گازها در دوره‌های آتی به‌طور قطعی امکان‌پذیر نیست، از این‌رو سناریوهای مختلفی که در برگزیده چگونگی تغییرات این

^۱ - Goddard

^۲ - Enthalpy

^۳ - Special Report on Emissions Scenarios

گازها در آینده است، ارائه شده که آن‌ها را سناریوهای انتشار می‌نامند (پری^۱ و همکاران، ۲۰۰۴: ۱۳، رنسلو^۲ و همکاران، ۲۰۰۵: ۱۲۰، هگویک^۳ و همکاران، ۲۰۰۵: ۳۰، آندرسون^۴ و همکاران، ۲۰۰۶: ۲۰۳). اما قبل از انتخاب سناریوی *p50* ارزیابی بر روی ۱۸ سناریوی منتخب انجام گردید تا آن سناریویی که با شرایط ایران، از لحاظ انتشار گازهای گلخانه‌ای با تاکید بر انتشار دی اکسید کربن، تناسب بیشتری دارد انتخاب گردد. در شبیه‌سازی داده‌های بارش ایران، دوره‌ی زمانی ۱۹۶۱-۱۹۹۰ به عنوان داده‌های پایه انتخاب و تغییرات بارش برای سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ با توجه به سناریوی پیشنهادی شبیه‌سازی گردید. در این تحقیق از نسخه ۵.۳ این نرم افزار مطابق با چهارمین گزارش *IPCC* استفاده شده است. نکته آخر این که قدرت تفکیک در این نرم افزار $2/5^{\circ} \times 2/5^{\circ}$ درجه می‌باشد که براساس آن کشور ایران به ۴۳ منطقه تقسیم می‌شود. برای مشاهده محدوده جغرافیایی این ۴۳ منطقه، می‌توان به مآخذ (روشن و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۴۴) مراجعه نمود.

۲-۲- محاسبه خشک‌سالی با استفاده از شاخص *SPI*

از گذشته تاکنون روش‌های متفاوتی برای محاسبه خشک‌سالی ارائه گردیده که از آنجمله می‌توان به شاخص‌های پالم^۵ (۱۹۶۵)، بالم^۶ و مولی^۷ (۱۹۸۰)، شاخص کمیّت رطوبت (ساستری^۸، ۱۹۹۳)، تاپسیس^۹ (خوش اخلاق و روشن، ۱۳۸۶) و غیره... اشاره کرد. اما شاخص *SPI*، به دلیل آن که مؤلفه‌ی اصلی آن بارش می‌باشد و به راحتی در دسترس محققان قرار دارد و نتایج آن با واقعیت، بیش‌تر مطابقت می‌نماید، اقبال محققان در استفاده از آن بیش‌تر بوده است (بناکرسو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۳، پائولو و همکاران، ۲۰۰۳، پائولو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۶، السا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۶). در این تحقیق جهت محاسبه خشک‌سالی‌های فصلی با استفاده از شاخص *SPI* در دوره آماری ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵، از داده‌های بارش ماهانه ۷۰ ایستگاه همدید و کلیماتولوژی در سراسر ایران استفاده شد (شکل ۲). در هر یک از ۴۳ منطقه‌ی مورد مطالعه به صورت تقریبی ۲ تا ۳ ایستگاه، به نوعی که بتوانند نماینده جغرافیایی آن باشند، انتخاب و از نتایج آن‌ها برای منطقه مورد نظر میانگین‌گیری و به‌عنوان خروجی آن زون معرفی شدند. سپس براساس میانگین درازمدت (۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵)، مقادیر خشک‌سالی به صورت فصلی برای هر یک از ۴۳ منطقه براساس سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ شبیه‌سازی و محاسبه گردید. هم‌چنین به منظور تعیین روند خشک‌سالی‌ها در بستر زمان، از روش همبستگی پیرسون و جهت تعیین معناداری روند و محاسبه *p-Value* از روش رگرسیون خطی استفاده شد. از آن‌جا که سطح معنی داری قابل اطمینان در آمار اقلیمی ۹۰ و ۹۵ درصد است، *p-Value* در سطح ۰/۰۵ به عنوان سطح معنی داری قابل اعتنا لحاظ گردید. هم‌چنین کلیه محاسبات در نرم افزار *SPSS* انجام شد. به‌علاوه برای محاسبه تغییرات دهه‌ای خشک‌سالی‌ها، دوره مورد مطالعه به سه دهه ۱۹۷۶-۱۹۸۵،

^۱- Parry

^۲- Rounsevell

^۳- Hoogwijk

^۴- Andersson

^۵- Palmer

^۶- Bhalme

^۷- Sastri

^۸- Topsis

^۹- Bonaccorso

^{۱۰}- Paulo

^{۱۱}- Elsa

۱۹۸۶-۱۹۹۵ و ۱۹۹۶-۲۰۰۵ تقسیم و تغییرات خشک‌سالی‌ها نسبت به دهه‌ی قبل محاسبه گردید. پهنه‌بندی مقادیر خشک‌سالی در دهه‌های آتی نیز بوسیله روش *IDW* انجام شد. لازم به توضیح است که شاخص *SPI* برای هر منطقه، بر پایه داده‌های بلند مدت بارش، برای دوره‌ی مطلوب محاسبه می‌گردد. این دوره بلند مدت ابتدا با توزیع آماری مناسب برازش داده شده، سپس تابع جمع‌ی توزیع با استفاده از روابط احتمالی زیر به متغیر تصادفی توزیع نرمال استاندارد، با میانگین صفر و انحراف معیار یک، تبدیل می‌گردد (رابطه ۱ و ۲):

$$\text{رابطه (۱):} \quad Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad 0 < H(x) \leq 0.5$$

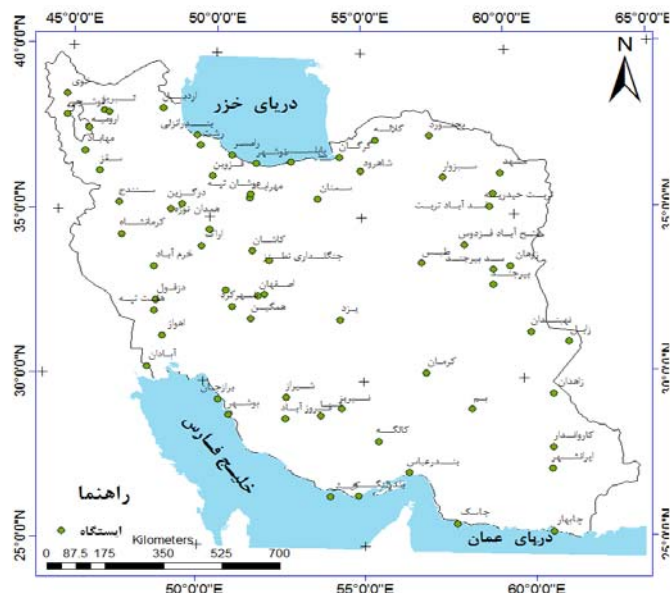
$$\text{رابطه (۲):} \quad Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad 0.5 < H(x) < 1$$

$H(X)$ تابع احتمال جمع‌ی و مقادیر $d_3, d_2, d_1, c_2, c_1, c_0$ ضرایب ثابت زیر می‌باشند (رابطه ۳ و ۴):

$$\text{رابطه (۳):} \quad c_0 = 2.515517 \quad c_1 = 0.802853 \quad c_2 = 0.010328$$

$$\text{رابطه (۴):} \quad d_1 = 1.432788 \quad d_2 = 0.189269 \quad d_3 = 0.001308$$

بنابراین *SPI* متغیر نرمال شده Z با متوسط صفر و انحراف معیار یک می‌باشد. از شاخص *SPI* برای مطالعه جنبه‌های مختلف خشک‌سالی از جمله پیش‌بینی، آنالیز تکرار، آنالیزهای مکانی - زمانی و مطالعات تاثیر اقلیمی استفاده شده است.

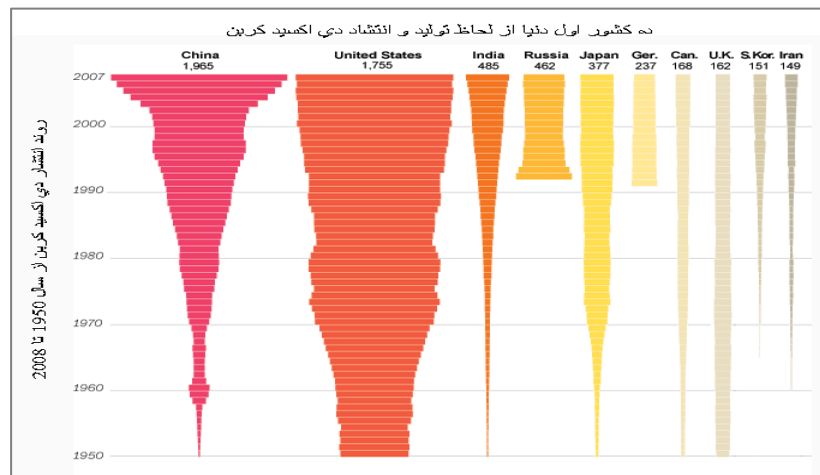


شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش

۳- یافته‌ها

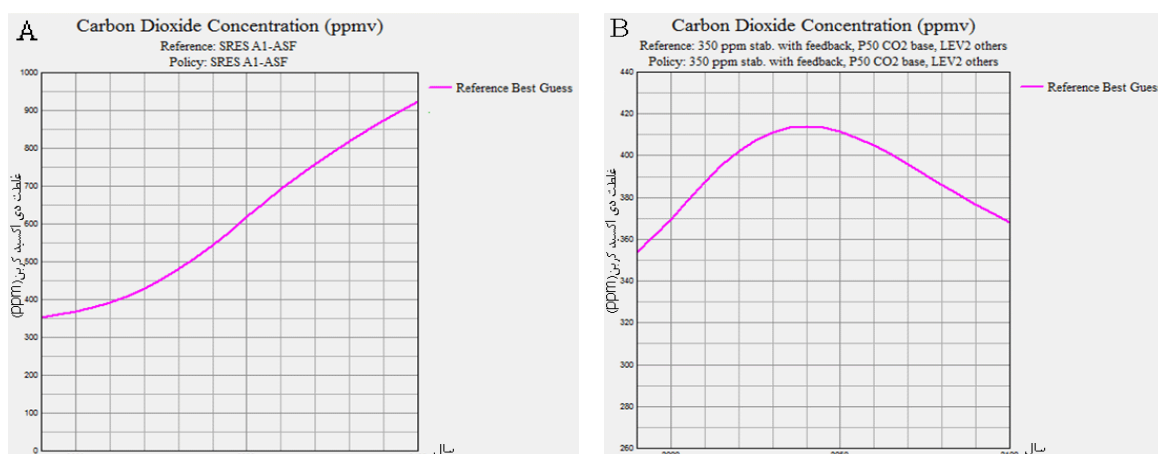
۳-۱- تشریح نحوه ارزیابی و انتخاب سناریو

همان‌گونه که مشخص است، سناریوهای تغییر اقلیم به سه دسته بدبینانه، خوشبینانه و متوسط تقسیم می‌شود که هر کشور، با توجه به اقتضای اقتصادی، زیست محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و غیره... باید سناریویی که همخوانی بیش‌تر با شرایط آن کشور دارد انتخاب نماید. کشور ایران با سهم ۱/۶۹ درصد از انتشار دی اکسید کربن در سطح جهان، در جایگاه ده کشور برتر دنیا قرار دارد (شکل ۳).



شکل ۳. ده کشور اول دنیا که تا سال ۲۰۰۸ بیش‌ترین سهم را در انتشار دی اکسید کربن داشته اند. (منبع: روزنامه واشینگتن پست. دسترسی ۲۰۱۰)

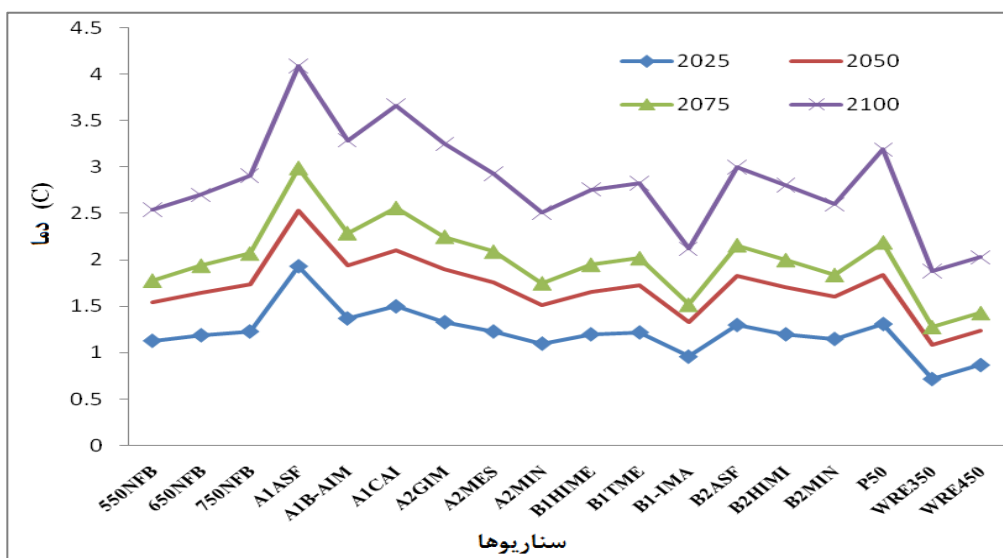
بنابراین، این اقتضا باعث می‌شود که سناریوی انتخابی از نوع سناریوهای بدبینانه باشد. در ادامه نحوه انتشار دی اکسید کربن جو تا سال ۲۱۰۰، به وسیله دو سناریوی *بدبینانه AIASF* و خوش بینانه *WER350* نشان داده شده است (شکل ۴).



شکل ۴. (A) غلظت دی اکسید کربن به وسیله سناریوی بدبینانه *AIASF* تا سال ۲۱۰۰ و (B) غلظت دی اکسید کربن به وسیله سناریوی خوشبینانه *WER450* تا سال ۲۱۰۰

همانگونه که شکل ۲ نشان می‌دهد، نقطه‌ی اوج دی‌اکسیدکربن به‌وسیله سناریوی *AIASF* در سال ۲۱۰۰ به میزان 470 ppm خواهد بود. در صورتی که نقطه اوج دی‌اکسیدکربن به‌وسیله سناریوی *WER450* در سال ۲۰۵۰ و به میزان 417 ppm رخ خواهد داد. از آن‌جا که سناریوهای خانواده *A*، از بدبینانه‌ترین سناریوها می‌باشند، لذا این سناریوها بیش‌تر مناسب کشورهای نظیر ایالات متحده، روسیه، چین و هند می‌باشد. هم‌چنین سناریوهای خانواده *WRE* با شرایط کشورهای کمتری سهم در انتشار دی‌اکسیدکربن جو دارند مطابقت می‌نماید. پس انتخاب سناریویی از خانواده این سناریوها با شرایط ایران سازگاری نداشته و از واقعیت به دور است.

در این پژوهش برای تصمیم‌گیری درباره نحوه‌ی انتخاب سناریوی مناسب، ۱۸ سناریو انتخاب، و به‌وسیله آن‌ها میانگین مقادیر دمای کشور از سال ۲۰۲۵ تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی گردید (شکل ۵). با توجه به شکل ۴، بیش‌ترین دمای کشور به‌وسیله سناریوهای خانواده *A*، بالاخص سناریوی *AIASF* می‌باشد که میانگین افزایش دمای کشور را تا سال ۲۱۰۰ به میزان $4/6$ سلسیوس و کمترین آن به‌وسیله سناریوهای خانواده *WER*، بویژه سناریوی *WER350* شبیه‌سازی گردیده که میانگین افزایش دمای کشور تا سال ۲۱۰۰ را به مقدار $2/1$ درجه سلسیوس شبیه‌سازی نموده است. اما در بین سناریوهای منتخب، سناریوی *P50* از خصوصیت قابل توجه برخوردار است. ابتدا این‌که این سناریو میانگین سناریوهای انتشار *SERE* بوده، پس میانگینی از خصوصیت تمام سناریوهای انتشار را دارد و از طرف دیگر خصوصیت سناریوهای بدبینانه، هر چند نه به اندازه سناریوهای خانواده *A*، در آن نمود بیش‌تری دارد. همانگونه که شکل ۱ نیز نشان می‌دهد، نحوه انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در این سناریو کمتر از سناریوهای خانواده *A* می‌باشد. در این سناریو میانگین افزایش دمای کشور تا سال ۲۱۰۰، به میزان $3/5$ درجه سلسیوس شبیه‌سازی شده است که این می‌تواند به واقعیت کشور ما نزدیک‌تر باشد. بنابراین از این به بعد برای شبیه‌سازی مقادیر بارش کشور از این سناریو استفاده می‌شود.



شکل ۵. شبیه‌سازی افزایش میانگین دمای سالانه کشور بر اساس سناریوهای مختلف تا سال ۲۱۰۰

۳-۲- روند خشک‌سالی‌های کشور از گذشته تا سال‌های اخیر

در ادامه این پژوهش لازم گردید تا مروری مختصر بر خشک‌سالی‌های دهه‌های گذشته تا سال‌های اخیر (۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵)، برای ۴۳ منطقه مطالعاتی انجام پذیرد. همانگونه که مشخص است کشور ایران در محدوده آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک جهان قرار دارد و این ویژگی باعث گردیده تا فصل تابستان بدون بارش، یا مناطقی بسیار محدود دارای بارش تابستانه باشند. چنین خصوصیتی باعث می‌گردد که محاسبه خشک‌سالی‌ها برای این فصل بی‌معنا و آن‌چنان جنبه علمی نداشته باشد. این عامل باعث گردید تا فقط مروری بر روی خشک‌سالی‌های فصول پاییز، زمستان و بهار انجام شود که نتایج در جداول (۱ و ۲ و ۳) آورده شده است.

در نگاه کلی برای خروجی‌های فصل پاییز در جدول (۱)، مشخص است که برای اکثر مناطق، مقادیر دهه‌ای شاخص SPI ، بیانگر مقادیر کاهشی و منفی است. این به معنای افزایش روند خشک‌سالی‌ها در فصل پاییز است. اما اگر چه تغییرات دهه‌ای شاخص SPI نشان دهنده افزایش خشک‌سالی‌هاست، اما این روند افزایشی برای همه‌ی مناطق معنادار نیست. تنها مناطقی که معنادار بوده شامل مناطق مطالعاتی ۹ و ۲۵ می‌باشند. مناطق معنادار شامل جنوب‌غرب آذربایجان ($r = -0.41, P = 0.022$), $r = -0.43$ و جنوب‌ایلام ($r = -0.43, P = 0.015$) هستند.

جدول (۱): ارزش‌های آماری (ضریب همبستگی و ارزش P value) به‌همراه تغییرات دهه‌ای ضریب SPI برای فصل پاییز

ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P	ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P
۱	-۰/۳۹	-۰/۲۹	۰/۱۱۲	۲۳	-۰/۲۰۹	-۰/۲۱۴	۰/۲۵۶
۲	-۰/۲۷	-۰/۲۷	۰/۱۴	۲۴	-۰/۳۰۹	-۰/۲۳۴	۰/۲۱۳
۳	-۰/۳	-۰/۱۲	۰/۵۱۲	۲۵	-۰/۴۳	-۰/۴۳۹	۰/۰۱۵
۴	۰/۰۲	۰/۳	۰/۱۰۴	۲۶	-۰/۱۱	-۰/۱۳۳	۰/۴۸۲
۵	۰/۱۵۹	۰/۴۵۲	۰/۰۱۲	۲۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۸	۰/۹۶۵
۶	-۰/۱۲	-۰/۰۲۷	۰/۸۸۸	۲۸	-۰/۱۸	-۰/۱۳	۰/۴۹۲
۷	-۰/۰۶	-۰/۰۳۷	۰/۸۴۵	۲۹	-۰/۲۱	-۰/۰۷	۰/۶۸۱
۸	-۰/۱۷	-۰/۱۰	۰/۵۶۴	۳۰	-۰/۳۹	-۰/۳۰۴	۰/۱۰۲
۹	-۰/۵۳	-۰/۴۱۵	۰/۰۲۲	۳۱	-۰/۲۸	-۰/۱۹۴	۰/۳۰۴
۱۰	-۰/۴۱	-۰/۳	۰/۱۰۶	۳۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۸۵
۱۱	-۰/۰۵	۰/۰۲۸	۰/۸۸۴	۳۳	۰/۰۴	۰/۰۲۷	۰/۸۸۴
۱۲	-۰/۲۴	-۰/۱۲	۰/۵	۳۴	۰/۰۱۱	۰/۱۶۳	۰/۳۸۶
۱۳	-۰/۰۳	-۰/۰۱۳	۰/۹۴۶	۳۵	-۰/۰۲۱	-۰/۱	۰/۵۸۴
۱۴	-۰/۱۶	-۰/۲	۰/۲۶۹	۳۶	-۰/۱۵	-۰/۰۹	۰/۶۰۳
۱۵	-۰/۱۹	-۰/۱۹	۰/۳۰۴	۳۷	-۰/۱۸	-۰/۱۶	۰/۳۸۲
۱۶	-۰/۲۳	-۰/۲۴	۰/۱۹	۳۸	-۰/۰۶	۰/۰۰۹	۰/۹۶
۱۷	۰/۰۴	۰/۰۰۵	۰/۹۷۸	۳۹	-۰/۱۳	-۰/۰۷	۰/۶۹۵

ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P	ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P
۱۸	-۰/۳۲	-۰/۲۱۶	۰/۲۵	۴۰	-۰/۱۸	-۰/۱۱۲	۰/۵۵۶
۱۹	-۰/۲۵	-۰/۱۵۳	۰/۴۱۹	۴۱	-۰/۱۵۶	-۰/۱۲۹	۰/۴۹۶
۲۰	-۰/۲	-۰/۱۵۵	۰/۴۱۲	۴۲	-۰/۰۹	-۰/۰۹	۰/۶۲۶
۲۱	-۰/۱۹	-۰/۲۱۴	۰/۲۵۶	۴۳	-۰/۰۶	-۰/۱۱۴	۰/۵۴۷
۲۲	-۰/۲	-۰/۱۶	۰/۳۹۲	-	-	-	-

در فصل زمستان، اکثر نواحی مطالعاتی، کاهش دهه‌ای شاخص *SPI* را نشان می‌دهند که این کاهش شاخص تنها برای نواحی مطالعاتی ۱، ۲، ۲۵، ۱۰، ۲۹، ۴۰ و ۴۱ معنادار است. این مناطق شامل شمال آذربایجان (Decade/*SPI*=-0.33, $r=-0.42$, $P=0.019$)، شرق آذربایجان (Decade/*SPI*=-0.34, $r=-0.46$, $P=0.010$)، شمال کردستان، غرب زنجان، جنوب شرق آذربایجان (Decade/*SPI*=-0.39, $r=-0.55$, $P=0.001$)، غرب خوزستان و جنوب ایلام (Decade/*SPI*=-0.17, $r=-0.413$, $P=0.023$)، جنوب فارس (Decade/*SPI*=-0.247, $r=-0.38$, $P=0.037$) و غرب هرمزگان (Decade/*SPI*=-0.37, $r=-0.42$, $P=0.019$) است. اما نکته جالب توجه این‌که دو محدوده مطالعاتی ۴ و ۵ که شامل نواحی غربی دریای خزر و غرب گیلان (Decade/*SPI*=+0.029, $r=0.42$, $P=0.021$) و شمال غرب گلستان (Decade/*SPI*=+0.137, $r=0.71$, $P=0.000$) می‌شود، روند مثبت شاخص *SPI*، بیانگر افزایش معنادار ترسالی‌هاست، (جدول ۲).

جدول (۲): ارزش‌های آماری (ضریب همبستگی و ارزش *P value*) به همراه تغییرات دهه‌ای ضریب *SPI* برای فصل زمستان

ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P	ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P
۱	-۰/۳۴	-۰/۴۶	۰/۰۱۰	۲۳	-۰/۰۲۷	-۰/۱۲	۰/۵۲۸
۲	-۰/۳۳	-۰/۴۲	۰/۰۱۹	۲۴	-۰/۰۲۴	-۰/۰۳۷	۰/۸۴۳
۳	۰/۰۷۸	۰/۰۳	۰/۸۶۹	۲۵	-۰/۱۷۲	-۰/۴۱۳	۰/۰۲۳
۴	۰/۰۲۹	۰/۴۲۱	۰/۰۲۱	۲۶	-۰/۱۱۷	-۰/۱۳۳	۰/۴۸۲
۵	۰/۱۳۷	۰/۷۱۳	۰/۰۰۰	۲۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۸	۰/۹۶۵
۶	-۰/۲۲	-۰/۳۴۱	۰/۰۶۶	۲۸	-۰/۱۵۴	-۰/۲۴	۰/۱۹۲
۷	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۴۸۷	۲۹	-۰/۱۸	-۰/۲۹	۰/۱۱۷
۸	-۰/۲۲	-۰/۳۱	۰/۰۸۸	۳۰	-۰/۱۵۶	-۰/۲۷۲	۰/۱۴۶
۹	-۰/۱۸	-۰/۷	۰/۳۲۳	۳۱	-۰/۰۳۴	-۰/۱۲	۰/۵۲۶
۱۰	-۰/۳۹	-۰/۵۵۳	۰/۰۰۱	۳۲	-۰/۰۱۷	-۰/۱	۰/۵۹۸
۱۱	۰/۳۶	۰/۳۶۶	۰/۰۵	۳۳	۰/۰۴	۰/۰۲۷	۰/۸۸۴
۱۲	۰/۰۱۳	-۰/۰۲۳	۰/۹۰۳	۳۴	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۶۳۴

ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P	ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P
۱۳	-۰/۱۷۱	-۰/۲۳	۰/۲۳۱	۳۵	-۰/۲۱	-۰/۱۰۳	۰/۵۸۴
۱۴	-۰/۱۲	-۰/۶	۰/۵۲	۳۶	۰/۰۰۴	-۰/۱۲۵	۰/۵۰۹
۱۵	-۰/۱۰۴	-۰/۲۲۷	۰/۲۲۷	۳۷	-۰/۱۸۹	-۰/۱۶۵	۰/۳۸۲
۱۶	-۰/۰۲۴	۰/۰۶۷	۰/۷۲۲	۳۸	-۰/۰۶	-۰/۱۴۱	۰/۴۵۷
۱۷	-۰/۰۵	-۰/۱۳	۰/۴۷۵	۳۹	-۰/۱۳	-۰/۰۷	۰/۶۹۵
۱۸	۰/۰۰۰۵	-۰/۰۸	۰/۶۴۴	۴۰	-۰/۲۴۷	-۰/۳۸	۰/۰۳۷
۱۹	-۰/۱۱	-۰/۱۹	۰/۳۱۵	۴۱	-۰/۳۷	-۰/۴۲۳	۰/۰۱۹
۲۰	۰/۰۷	۰/۰۳۷	۰/۸۴۶	۴۲	-۰/۰۹	-۰/۰۹۳	۰/۶۲۶
۲۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۷۸۵	۴۳	-۰/۰۶	-۰/۱۱۴	۰/۵۴۷
۲۲	۰/۱۷۳	۰/۱۲۷	۰/۵۰۳	-	-	-	-

در فصل بهار، همانند دیگر فصول سال، اکثر تغییرات دهه‌ای، نشان دهنده‌ی افزایش خشک‌سالی‌هاست، که حدود ۸ منطقه مطالعاتی شامل نواحی ۲، ۱۰، ۲۴، ۲۸، ۳۰، ۳۶، ۴۰ و ۴۲ را تحت پوشش قرار می‌دهد و دارای روند معنادار و تا حدودی معنادار است. این مناطق به ترتیب شامل شرق آذربایجان ($r = -0.42, P = 0.019$)، شمال کردستان، غرب زنجان، جنوب شرق آذربایجان ($r = -0.591, P = 0.023$)، جنوب شرق اصفهان، جنوب یزد ($r = -0.33, P = 0.063$)، شمال شرق کرمان، جنوب خراسان جنوبی ($r = -0.51, P = 0.003$)، جنوب غرب هرمزگان، جنوب غرب کرمان ($r = -0.34, P = 0.061$)، جنوب فارس ($r = -0.38, P = 0.037$)، شرق هرمزگان، جنوب کرمان، جنوب غرب سیستان ($r = -0.15, P = 0.08$)، شرق هرمزگان، جنوب کرمان، جنوب غرب سیستان ($r = 0.32, P = 0.08$)، است. ارزش‌های آماری مذکور، بیانگر معنادار و تا حدودی معنادار بودن روند افزایش خشک‌سالی‌ها می‌باشد. ولی در بین مناطق مختلف کشور، این تنها منطقه مطالعاتی ۴۱ و یا همان غرب هرمزگان است که با مقادیر آماری ($r = 0.42, P = 0.019$)، Decade/SPI = -0.379 افزایش معنی‌دار روند ترسالی‌ها را نشان می‌دهد (جدول ۳).

جدول (۳): ارزش‌های آماری (ضریب همبستگی و ارزش $P value$) به همراه تغییرات دهه‌ای ضریب SPI برای فصل بهار

ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P	ردیف منطقه	تغییرات دهه‌ای	ضریب همبستگی	ارزش P
۱	-۰/۲۴	-۰/۱۶۸	۰/۳۷۲	۲۳	-۰/۲۷	-۰/۲	۰/۲۸۹
۲	-۰/۳۳	-۰/۴۲	۰/۰۱۹	۲۴	-۰/۳۶۱	-۰/۳۲	۰/۰۷۹
۳	۰/۰۷۴	۰/۰۳۱	۰/۸۶۹	۲۵	-۰/۰۲	۰/۰۱۶	۰/۹۳۳
۴	-۰/۰۰۳	-۰/۰۵	۰/۷۹۴	۲۶	-۰/۰۵	-۰/۰۲۸	۰/۸۸۳
۵	۰/۱۶۲	۰/۱۶۱	۰/۳۹۷	۲۷	۰/۰۵۸	۰/۰۰۸	۰/۹۶۵

ارزش P	ضریب همبستگی	تغییرات دهه‌ای	ردیف منطقه	ارزش P	ضریب همبستگی	تغییرات دهه‌ای	ردیف منطقه
۰/۰۶۳	-۰/۳۳	-۰/۳۶	۲۸	۰/۸۴	۰/۳۸	-۰/۰۱	۶
۰/۸۱۸	-۰/۰۴	-۰/۱۲۸	۲۹	۰/۳۷۷	۰/۱۶۷	۰/۱	۷
۰/۰۰۳	-۰/۵۱	-۰/۶۵	۳۰	۰/۲۵۸	-۰/۲۱	-۰/۲۸	۸
۰/۱۷	-۰/۲۵۷	-۰/۱۴	۳۱	۰/۲۳۱	-۰/۲۲۵	-۰/۴۰۵	۹
۰/۶۳۲	-۰/۰۹	-۰/۰۶	۳۲	۰/۰۲۳	-۰/۴۱۳	۰/۵۹۱	۱۰
۰/۹۶	-۰/۰۰۹	۰/۰۲۱	۳۳	۰/۷۹۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۱۱
۰/۱۷۸	-۰/۲۵	-۰/۲۶	۳۴	۰/۹۶۸	۰/۰۸	۰/۰۱۹	۱۲
۰/۱۵۵	-۰/۲۶	-۰/۳۳۷	۳۵	۰/۳۳۳	۰/۱۸۳	۰/۱۴	۱۳
۰/۰۶۱	-۰/۳۴۵	-۰/۲۸۴	۳۶	۰/۶۲۵	-۰/۰۹	-۰/۱۳	۱۴
۰/۴۱۵	-۰/۱۵۴	-۰/۲۸	۳۷	۰/۳۵۹	-۰/۱۷	-۰/۲۱	۱۵
۰/۳۵۸	-۰/۱۷۴	-۰/۱۸۹	۳۸	۰/۱۰۷	-۰/۲۹	-۰/۳۴	۱۶
۰/۲۴۱	-۰/۲۲۱	-۰/۱۴	۳۹	۰/۹۶۱	۰/۰۰۹	-۰/۰۱۱	۱۷
۰/۰۳۷	-۰/۳۸	-۰/۲۴۷	۴۰	۰/۹۶۲	-۰/۰۰۹	-۰/۰۶	۱۸
۰/۰۱۹	۰/۴۲۷	-۰/۳۷۹	۴۱	۰/۹۵۶	-۰/۰۱	-۰/۰۲	۱۹
۰/۰۸	-۰/۳۲	-۰/۱۵	۴۲	۰/۶۷۵	۰/۰۸	-۰/۱۱	۲۰
۰/۰۹۴	-۰/۳۱	-۰/۳۰۴	۴۳	۰/۷۸۵	۰/۰۵۱	۰/۰۲۷	۲۱
-	-	-	-	۰/۶۰۵	-۰/۰۹	-۰/۱۷	۲۲

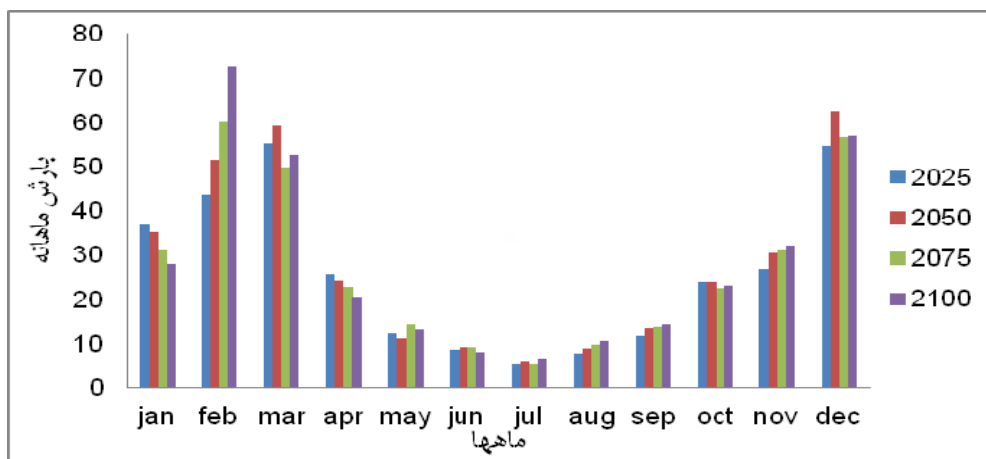
در نتیجه‌گیری کلی از خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌های سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ می‌توان به این نتیجه دست یافت که وقوع روند افزایشی و معنادار خشک‌سالی‌ها برای فصول مختلف سال، از نسبت بیش‌تری در مقایسه با ترسالی‌ها برخوردار است. اما نتایج این قسمت نشان‌دهنده‌ی آن است که در بین فصول مطالعاتی، بیش‌ترین رخداد فراوانی خشک‌سالی‌ها در بین ۴۳ منطقه مطالعاتی، ابتدا برای فصل زمستان، سپس بهار و در نهایت در فصل پاییز وجود دارد.

۳-۳- شبیه‌سازی مقادیر بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو

مقادیر مؤلفه‌ی بارش برای سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، از نتایج ترکیبی دو مدل *CNRM-CM3* و *GISS-EH* استفاده شده است. در ابتدا به منظور ارزیابی توانمندی مدل‌های مذکور در شبیه‌سازی مقادیر بارش، ضریب همبستگی بین سری زمانی داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵ محاسبه گردید. ضرایب همبستگی بین سری داده‌های واقعی و شبیه‌سازی شده بارش در مدل *CNRM-CM3* ($r=0/91$) و مدل *GISS-EH* ($r=0/85$) محاسبه گردید.

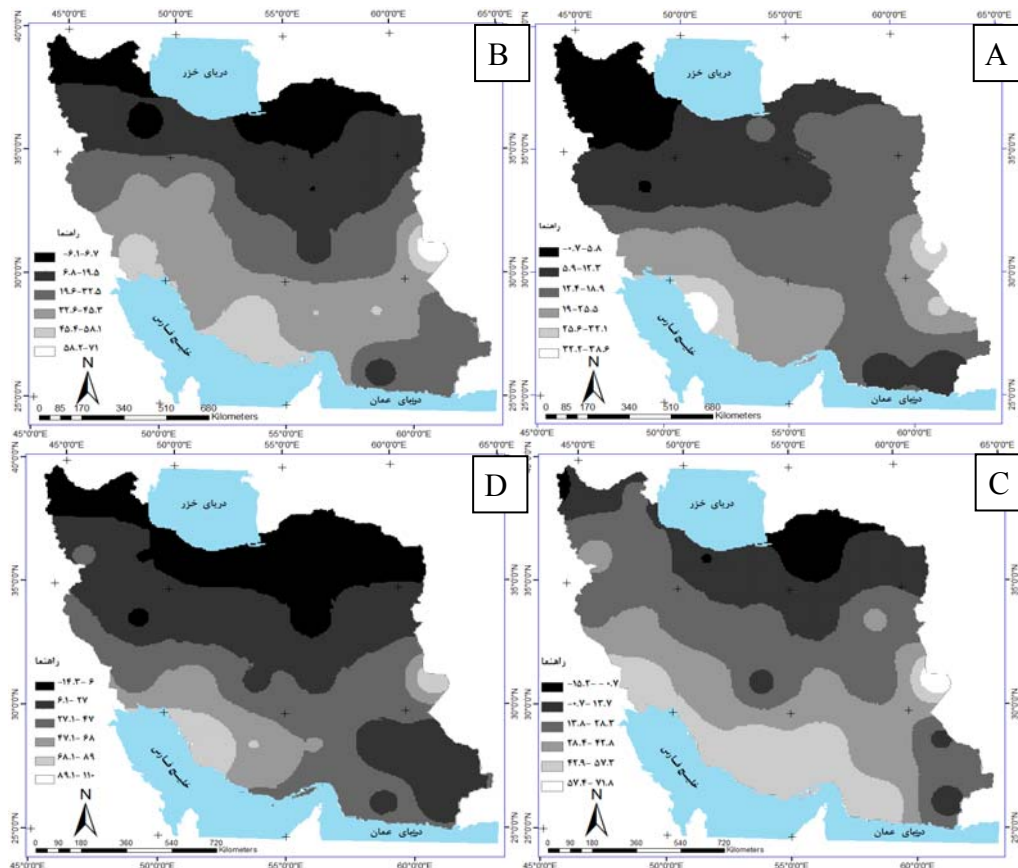
با توجه به میانگین سالانه و درازمدت (۱۹۶۱-۱۹۹۰) بارش (۲۸۲/۶۶ میلی‌متر) در ایران، تمام دوره‌های شبیه‌سازی شده، از افزایش بارش نسبت به این میانگین درازمدت برخوردار خواهند گردید. مقادیر شبیه‌سازی شده برای سال ۲۰۲۵ نسبت به میانگین درازمدت (۱۹۶۱-۱۹۹۰) گویای افزایش بارش کشور به میزان ۳۰/۰۹ میلی‌متر،

در سال ۲۰۵۰ افزایش بارش ۵۲/۸۳، سال ۲۰۷۵ افزایش بارش به میزان ۴۳/۷۵ میلی‌متر و در سال ۲۱۰۰ افزایش بارش ۸۸ میلی‌متر خواهد بود. هم‌چنین حداکثر افزایش بارش در سال ۲۰۲۵ به میزان ۳۴ تا ۳۸ درصد، به ترتیب برای مناطقی نظیر شرق و جنوب بوشهر، نواحی شرق فارس و خلیج فارس پیش‌بینی می‌شود. حال آن‌که حداکثر کاهش بارش به میزان ۱/۶۵- برای شمال آذربایجان شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی انجام شده برای مقادیر بارش سال ۲۰۵۰، نوسانات بارش از ۱۱/۱۴- درصد تا ۷۱/۳ درصد متغییر بوده است. در این بررسی مقادیر خروجی بیانگر این موضوع است که مناطقی همانند شمال خراسان، شمال آذربایجان، شمال خراسان رضوی و گلستان حداکثر کاهش بارش را تجربه خواهند کرد و مناطق شرق خلیج فارس و بوشهر، شمال سیستان و بلوچستان، با بیش‌ترین مقدار در افزایش بارش مواجه خواهند شد. شبیه‌سازی تغییرات بارش سالانه نسبت به میانگین درازمدت (۱۹۶۱-۱۹۹۰) کاهش بارش به میزان ۸ میلی‌متر را برای سال ۲۰۷۵ نسبت به ۲۰۵۰ به دست می‌دهد. در این دوره مطالعاتی نوسان بارش در میان نواحی مختلف به میزان افزایشی ۹۲ درصد محاسبه می‌شود، که مناطقی هم‌چون شمال غرب گلستان و شمال خراسان رضوی با کاهش بارش به میزان ۱۹- درصد نسبت به میانگین درازمدت، از افت بسیار شدیدی در این دوره مطالعاتی برخوردار بوده‌اند. ولی شرق خلیج فارس و بوشهر، به‌همراه شمال سیستان و بلوچستان به میزان ۷۱ درصد افزایش بارش نسبت به میانگین درازمدت، وضعیت بهتری در مقایسه با دیگر نواحی مطالعاتی برخوردار خواهند شد. در دوره مطالعاتی ۲۱۰۰، درصد میانگین تغییرات بارش کشور نسبت به ۳ دوره شبیه‌سازی شده قبل، افزایش یافته است. با افزایش درصد تغییرات مثبت بارش کشور، میزان نوسان بارش نیز افزایش یافته است. این نوسان از ۹۲ درصد در سال ۲۰۷۵ به ۱۴۰.۵ درصد در سال ۲۱۰۰ افزایش داشته است. در ادامه میانگین بارش ماهانه کشور، برای دوره‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶). مقادیر شبیه‌سازی شده بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو بر حسب میلی‌متر

آن‌چه که از تغییرات سالانه بارش در این دوره مشاهده می‌گردد، وجود بیش‌ترین کاهش بارش به میزان ۲۹- درصد در نواحی شمال شرق کشور مثل چناران، شمال خراسان رضوی، گلستان و شمال غرب گلستان می‌باشد. در پیش‌بینی مقادیر افزایش بارش، حداکثر این مقادیر مثبت نیز همانند قبل برای نواحی شرق بوشهر و خلیج فارس و نواحی جنوب خوزستان شبیه‌سازی گردیده که میزان آن تا ۱۱۰ درصد محاسبه شده است (شکل ۷).



شکل (۷): شبیه‌سازی میانگین درصد تغییرات سالانه بارش با استفاده از نتایج ترکیبی دو مدل *GISS-EH* و *CNRM* برای سال‌های ۲۰۲۵ (شکل a)، ۲۰۵۰ (شکل b)، ۲۰۷۵ (شکل c) و ۲۱۰۰ (شکل d). بیش‌ترین افزایش (کاهش) بارش برای رنگ روشن (تیره) در مقیاس مشخص گردیده است.

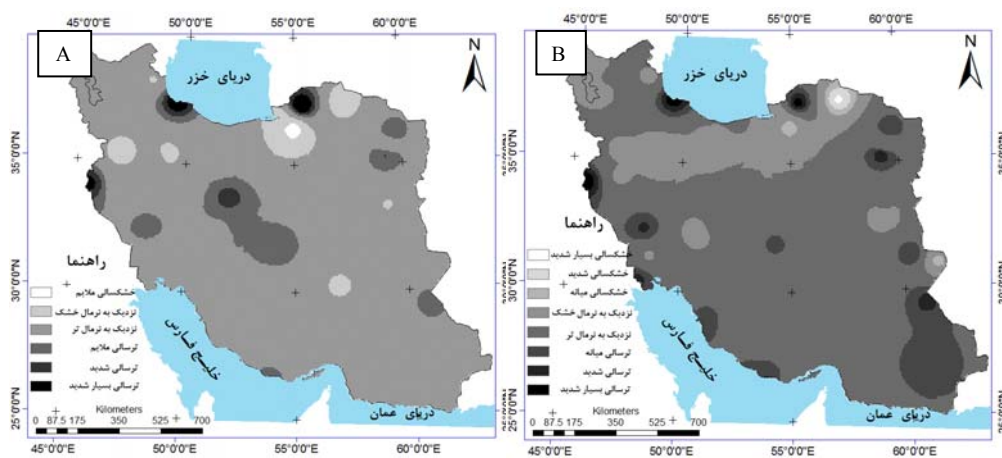
۳-۴- پهنه‌بندی مقادیر خشک‌سالی شبیه‌سازی شده

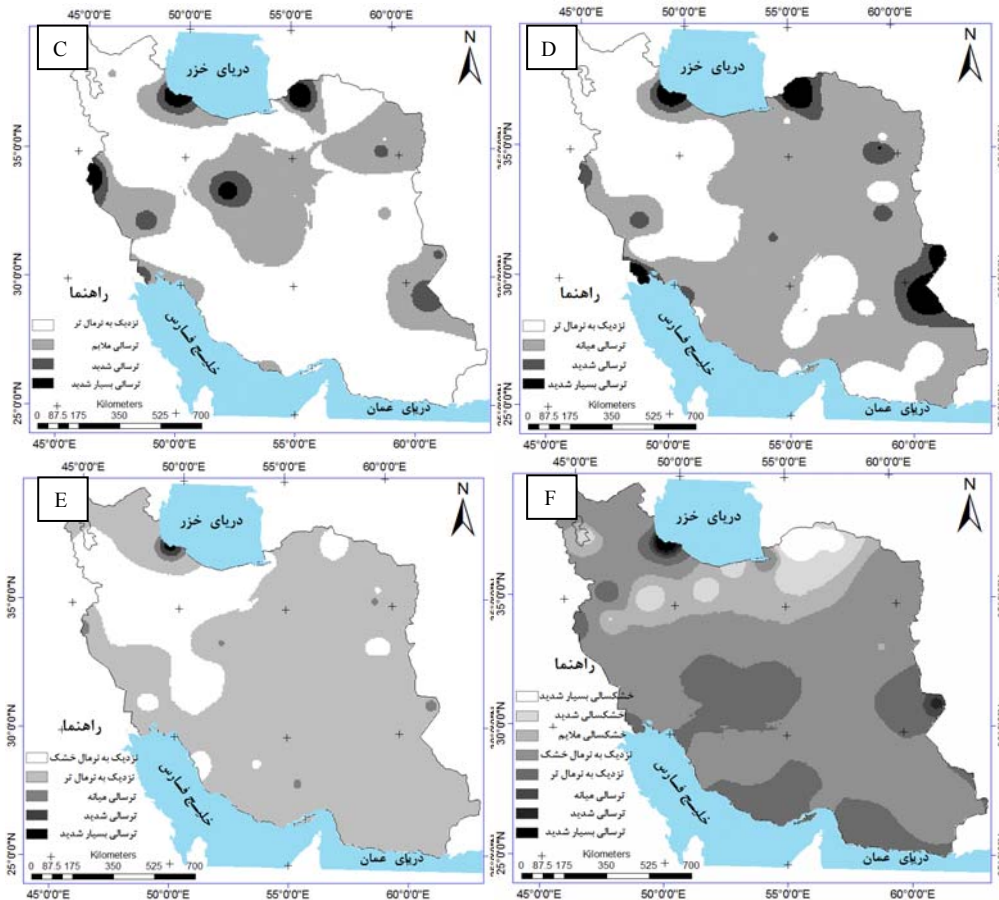
بعد از شبیه‌سازی بارش و پس از آن محاسبه مقادیر شاخص *SPI* مشخص گردید که در بین سال‌های شبیه‌سازی شده در فصل پاییز، به ترتیب سال‌های ۲۰۵۰ با میانگین شاخص استاندارد بارش به میزان $(SPI=0.60)$ ، ۲۰۷۵ با $(SPI=0.58)$ ، ۲۰۲۵ با میانگین $(SPI=0.53)$ و در نهایت سال ۲۱۰۰ با میانگین شاخص *SPI* به میزان $(SPI=0.47)$ برای ۴۳ منطقه‌ی مطالعاتی کشور در رتبه‌های اول تا چهارم ترسالی قرار گرفته‌اند. آنچه خروجی بارش استاندارد برای فصل پاییز سال‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد، این است که اکثر نواحی مطالعاتی برای این فصل در محدوده نزدیک به نرمال قرار گرفته‌اند. اما قابل توجه می‌باشد که نوسان خروجی *SPI* برای دوره‌ی مطالعاتی ۲۰۲۵ از میزان $-2/07$ برای ناحیه مطالعاتی شمال خراسان تا $2/93$ برای محدوده مطالعاتی شمال غرب گلستان نوسان دارد. این نوسان در سال ۲۰۵۰ از $-2/18$ برای شمال خراسان تا $2/66$ برای ناحیه مطالعاتی شمال غرب گلستان متغیر است. این وضعیت مجدداً برای سال‌های ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ به ترتیب با حداقل خروجی شاخص *SPI*، به مقدار $-2/21$ و $-0/09$ برای شمال خراسان و بیش‌ترین خروجی *SPI* برای سال ۲۰۷۵، به مقدار $2/67$ ، به ناحیه مطالعاتی غرب خزر و غرب گیلان و در سال ۲۱۰۰ به مقدار $2/46$ به‌طور مشترک برای نواحی ۴ و ۱۷ که شامل نواحی غرب خزر و گیلان، هم‌چنین

غرب کرمانشاه و غرب ایلام می‌باشد اختصاص یافته است. در این تحقیق به دلیل فضای کم مقاله، فقط به نقشه‌های پهنه‌بندی خشک‌سالی برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۱۰۰ اکتفا شده است. در هر حال با مراجعه به نقشه‌ی شماره (8-a,b) برای فصول پاییز ۲۰۲۵ و ۲۱۰۰، آشکار است که بالاترین ریسک رخداد خشک‌سالی برای نواحی شمال شرق و بیش‌ترین انتظار رخداد ترسالی برای سواحل شرقی دریای مازندران و کرمانشاه و شمال ایلام وجود دارد.

در فصل زمستان در سال ۲۱۰۰، بر خلاف پاییز که میانگین شاخص *SPI* برای ۴۳ ناحیه مطالعاتی از پایین‌ترین میزان خود نسبت به دیگر سال‌های شبیه‌سازی شده برخوردار بود، اما این بار بالاترین میانگین شاخص *SPI* برای این سال به میزان ۱/۱۶ درصد محاسبه گردید. در این فصل، سال ۲۰۵۰ با ۱/۰۸ درصد، سال ۲۰۲۵ با ۱/۰۱ و در نهایت سال ۲۰۷۵ با ۰/۹۹ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. در فصل زمستان همانند فصل پاییز، بیش‌تر مناطق در محدوده‌ی نزدیک به نرمال قرار گرفته‌اند، که این فراوانی به‌ترتیب در سال ۲۰۲۵، به تعداد ۲۷، در سال ۲۰۵۰ به تعداد ۲۶، سپس در سال ۲۰۷۵ به میزان ۲۸ و در نهایت در سال ۲۱۰۰ به میزان ۲۳ مورد شمارش گردید. به هر حال آن‌چه محدوده‌ی شاخص بارش استاندارد برای فصل زمستان نشان می‌دهد، حاکی از این است که در هیچ کدام از سال‌ها و مناطق ۴۳ گانه، شواهدی از خشک‌سالی وجود ندارد. به‌گونه‌ای که پایین‌ترین محدوده‌ی شاخص *SPI* برای تمام این سال‌ها، محدوده‌ی نزدیک به نرمال می‌باشد که انتظار می‌رود فصول زمستان برای این سال‌ها با رویکرد ترسالی همراه باشد. در این فصل، نوسان خروجی شاخص *SPI* برای سال‌های شبیه‌سازی شده، تقریباً در یک محدوده از تغییرات قرار گرفته است، به نوعی که حداقل میزان این شاخص با ۰/۰۵ برای ناحیه‌ی شمال خراسان رضوی و حداکثر آن با ۲/۸۴ در ناحیه‌ی غرب کرمانشاه و ایلام برای دوره مطالعاتی ۲۰۲۵ مشاهده می‌شود. محدوده‌ی نوسان این نمایه در سال ۲۰۵۰ با حداقل خروجی بارش استاندارد به مقدار ۰/۰۶ در ناحیه شمال خراسان و حداکثر آن با ۲/۸۳ درصد در ناحیه مطالعاتی غرب خزر و غرب گیلان نوسان داشته است. در سال ۲۰۷۵ این محدوده کمی تغییر کرده و از حداقل خروجی به میزان ۰/۰۳ درصد در ناحیه شمال خراسان و حداکثر آن به میزان ۲/۷۷ درصد، مجدداً در منطقه‌ی غرب گیلان و غرب خزر دیده می‌شود. در نهایت این سال ۲۱۰۰ می‌باشد که با بیش‌ترین نوسان به مقدار ۳/۰۴ معرفی می‌گردد، که حداقل نوسان برای این سال، مجدداً در ناحیه شماره ۷ یا همان شمال خراسان و به میزان ۰/۰۳ درصد محاسبه گردیده و بیش‌ترین نوسان برای ناحیه‌ی مطالعاتی غرب کرمانشاه و ایلام به مقدار ۳/۰۷ شبیه‌سازی شد. در عین حال نقشه‌های (8-c,d) آشکار می‌سازند که در سال ۲۰۲۵ مناطق مرکزی، جنوب و جنوب شرق ایران و دامنه‌های البرز و زاگرس، و برای سال ۲۱۰۰ نیز نواحی شمال غرب تا زاگرس میانی و جنوب دریای مازندران پتانسیل بیش‌تری برای رخداد خشک‌سالی خواهند داشت، اگرچه محدوده‌ی شاخص *SPI* برای این مناطق در طبقه‌ی نزدیک به نرمال قرار گرفته، اما باید در نظر گرفت که این مناطق از کم‌ترین میزان شاخص بارش استاندارد برخوردار بوده و به محدوده خشک‌سالی، نزدیک‌تر از سایر مناطق کشور می‌باشند. قابل ذکر است که سواحل شرقی و غربی دریای مازندران، شرق و خط مرزی غرب و جنوب غرب کشور، بالاترین احتمال رخداد ترسالی‌ها در سال‌های مطالعاتی ۲۰۲۵ و ۲۱۰۰ برخوردار می‌باشند. به‌علاوه در سال ۲۰۲۵، در محدوده استان اصفهان، نسبت سال ۲۱۰۰، احتمال وقوع رخداد ترسالی وجود دارد.

در فصل بهار، شرایط به‌گونه‌ای متفاوت از دو فصل پاییز و زمستان است. به‌طوری که میانگین شاخص بارش استاندارد برای ۴۳ منطقه مطالعاتی کشور در پایین‌ترین میزان خود نسبت به دو فصل دیگر است. سال‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهند که میانگین شاخص *SPI* در سال ۲۱۰۰ با ۰/۴- درصد، در پایین‌ترین مقدار نسبت به سال‌های دیگر است. این بدین معنی است که باید شاهد رخداد خشک‌سالی‌های بیش‌تر برای این دوره‌ی مطالعاتی بود. در بهار ۲۱۰۰، نوسان حداکثر و حداقل شاخص *SPI* به مقدار ۷/۲۹ درصد در بالاترین مقدار نسبت به تمام دوره‌ها و سال‌های مطالعاتی دیگر قرار دارد. در سال ۲۰۵۰، میانگین شاخص بارش استاندارد کل کشور، ۰/۱۱ درصد محاسبه گردید. این میانگین اگرچه در محدوده‌ی نزدیک به نرمال قرار گرفته است، اما حاکی از ریسک‌پذیری بالای کشور، از لحاظ رخداد خشک‌سالی‌ها برای اکثر مناطق ۴۳ گانه است. نوسان بین حداقل و حداکثر خروجی نمایه خشک‌سالی *SPI* با ۳/۲۲ درصد، بیان‌کننده‌ی بیش‌ترین ریسک رخداد خشک‌سالی‌ها برای مناطقی نظیر شمال خراسان و منطقه گلستان بوده و نوید بخش بالاترین ترسالی در نواحی غرب کرمانشاه و ایلام و غرب خزر و گیلان می‌باشد. در سال ۲۰۷۵ میانگین نمایه *SPI* به میزان چند صدم نسبت به سال ۲۰۵۰، بالاتر رفته و به ۰/۱۹ درصد رسیده است. اگرچه این مقدار نیز در طبقه‌ی نزدیک به نرمال واقع شده است، اما باز هم ریسک‌پذیری کشور از احتمال رخداد خشک‌سالی‌ها بالاست. فصل بهار در سال ۲۰۷۵، بالاترین فراوانی محدوده شاخص *SPI* به تعداد ۳۵ ناحیه مطالعاتی، در محدوده‌ی نزدیک به نرمال می‌باشد. در این دوره‌ی زمانی، اختلاف حداکثر و حداقل خروجی شاخص خشک‌سالی برای نواحی ۴۳ گانه، ۵/۶ درصد است. ولی این نوسان برای سال ۲۰۲۵، ۳/۰۷ درصد محاسبه می‌شود. در بهار ۲۰۲۵، بالاترین میانگین شاخص *SPI* به مقدار ۰/۲۲ درصد، برای این سال محاسبه می‌شود که انتظار می‌رود حدود ۶ منطقه جغرافیایی کشور در محدوده‌های ترسالی متوسط تا شدید قرار گرفته و مابقی این مناطق در محدوده‌ی خشک و تر نزدیک به نرمال واقع شوند. در این فصل از سال نیز، خشک‌ترین نواحی جغرافیایی برای شمال خراسان و پرباران‌ترین منطقه شامل غرب گیلان و خزر معرفی می‌گردد. همان‌طور که نقشه شکل (۸-ع) نشان می‌دهد در این فصل در سال ۲۰۲۵ بجز در سواحل غربی دریای مازندران، در سراسر کشور احتمال وقوع خشک‌سالی زیاد خواهد بود و در سال ۲۱۰۰ نیز بیش‌ترین ریسک خشک‌سالی‌ها در نواحی واقع در دامنه‌های ارتفاعات البرز خواهد بود.





شکل ۸. نقشه‌های شبیه‌سازی شده خشک‌سالی‌ها برای سال‌های ۲۰۲۵ و (۲۱۰۰) (a, b - پاییز)، (c, d - زمستان)، (e, f - بهار)

۴- نتیجه گیری

امروزه یکی از گام‌های اساسی در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، استفاده از نتایج مدل‌های گردش عمومی جو، برای بررسی تغییرات خشک‌سالی‌ها در بستر گرمایش جهانی است. در این تحقیق ابتدا برای تصمیم‌گیری درباره‌ی نحوه انتخاب سناریوی مناسب، ۱۸ سناریو انتخاب و به وسیله آن‌ها میانگین مقادیر دمای کشور از سال ۲۰۲۵ تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی شد تا بتوان مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی دما را با توجه به هریک از سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه مشخص، و جایگاه هر سناریو را در مقایسه با سناریوهای دیگر تعیین نمود. نتایج حاکی از آن است که با توجه به این‌که کشور ایران، با سهم ۱/۶۹ درصد از انتشار دی اکسید کربن در سطح جهان، در بین ده کشور برتر دنیا، از لحاظ انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار دارد، لذا سناریوی P50 از دو جهت دارای خصوصیت قابل توجه است که در این پژوهش از آن استفاده شده است. ابتدا این‌که این سناریو میانگین سناریوهای انتشار SERE بوده، لذا می‌تواند کلیتی از ویژگی‌های تمام سناریوهای انتشار را نشان دهد و از طرف دیگر، خصوصیت سناریوهای بدبینانه، هر چند نه به اندازه سناریوهای خانواده A، در آن نمود بیش‌تری دارد. در این سناریو میانگین افزایش دمای کشور تا سال ۲۱۰۰، به میزان ۳/۵ درجه سلسیوس شبیه‌سازی شده است. اما در ترکیب نتایج دو مدل گردش عمومی جو - GISS

EH و CNRM-CM3 با سناریوی P50 برای مقادیر بارش تا سال ۲۱۰۰، شبیه‌سازی‌ها از افزایش میانگین بارش کشور نسبت به میانگین درازمدت ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ خبر می‌دهد. به‌طوری که مقادیر شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده‌ی افزایش میانگین سالانه‌ی بارش کشور، به میزان ۳۰/۰۹ میلی‌متر، برای سال ۲۰۲۵ می‌باشد. این شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که در سال ۲۰۵۰ افزایش بارش ۵۲/۸۳ میلی‌متر، در سال ۲۰۷۵ افزایش بارش به میزان ۴۳/۷۵ میلی‌متر و در سال ۲۱۰۰ افزایش بارش به میزان ۸۸ میلی‌متر، بیش‌تر از میانگین درازمدت ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ خواهد بود.

در عین حال، آن‌چه از ارزیابی روند خشک‌سالی و ترسالی‌های کشور برای ۴۳ منطقه و داده‌های تجربی سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ حاصل گردید، این است که، از آن‌جایی که مؤلفه اصلی محاسباتی برای شاخص SPI، بارش است و این مؤلفه از ضریب تغییرات بالایی برخوردار است، پس مشخص نمودن روند معنادار برای اکثر مناطق کشور کاری دشوار است. حال آن‌که در نتیجه‌گیری کلی از خشک‌سالی و ترسالی‌های داده‌های تجربی، می‌توان به‌این نتیجه دست یافت که وقوع روند افزایشی و معنادار خشک‌سالی‌ها برای فصول مختلف سال، از نسبت بیش‌تری در مقایسه با ترسالی‌ها برخوردار است. هر چند نتایج این قسمت آشکار می‌سازد که در بین فصول مطالعاتی رخداد فراوانی خشک‌سالی‌ها در بین ۴۳ منطقه‌ی مطالعاتی، ابتدا برای فصل زمستان، سپس بهار و در نهایت در فصل پاییز وجود دارد، ولی بیش‌ترین رخداد ترسالی‌ها ابتدا در فصول زمستان برای نواحی غرب دریای خزر، غرب گیلان و شمال‌غرب گلستان رخ داده و سپس این روند در فصل بهار برای نواحی واقع در محدوده‌ی مطالعاتی غرب هرمزگان دیده می‌شود. به هر حال نتایج شبیه‌سازی شده خشک‌سالی برای سال‌های مورد نظر نیز با کمی تفاوت، شبیه داده‌های تجربی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ می‌باشد. بگونه‌ای که در اکثر سال‌ها و فصول سال، این نواحی غرب خزر و گیلان، به‌همراه نواحی غرب کرمانشاه و ایلام است که بالاترین ترسالی‌ها را تجربه خواهند کرد، از طرف دیگر این نواحی شمال خراسان و شمال خراسان رضوی است که از بالاترین احتمال رخداد خشک‌سالی‌ها برای سال‌ها و فصول شبیه‌سازی شده برخوردار می‌باشند. بهر حال با توجه به تمام نواحی جغرافیایی کشور، خروجی‌های بارش استاندارد نشان‌دهنده دورنمای نوید بخش بودن کشت دیم، برای کشوری خشک تا نیمه خشک شبیه ایران، در نواحی نظیر غرب کرمانشاه، ایلام، شمال و شرق سمنان و شمال یزد، غرب خراسان رضوی، شرق اصفهان و غرب گیلان و خزر، غرب خوزستان و جنوب‌ایلام و غرب سیستان و بلوچستان است. اما از طرف دیگر مناطقی نظیر شمال خراسان، شمال خراسان رضوی، گلستان، شمال غرب گلستان، مازندران و غرب سمنان به دلیل کاهش بارش‌ها، احتمال رخداد خشک‌سالی‌ها در آنها، نسبت به دیگر مناطق کشور بیش‌تر است. این عامل باعث می‌گردد تا اجتناب از کشت دیم و جایگزین نمودن کشت آبی را برای این نواحی و برای دوره‌های زمانی مورد نظر برنامه‌ریزی نمود.

۵- فهرست منابع

- (۱) اسماعیلی رضا، حبیبی نوخندان مجید، فلاح قاهره غلامعباس، (۱۳۸۹)، ارزیابی تغییرات دوره‌ی رشد و یخبندان ناشی از نوسانات اقلیمی، مطالعه‌ی موردی: خراسان رضوی، مجله‌ی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره‌ی ۷۳، صص ۶۹-۸۲.
- (۲) سایت روزنامه واشینگتن پست در سال ۲۰۰۸. دسترسی به منبع مورد نظر در سال ۲۰۱۰.
- (۳) شمسی پور علی اکبر. علوی پناه سید کاظم. محمدی حسین، (۱۳۸۹)، بررسی کارایی شاخص‌های گیاهی و حرارتی ماهواره NOAA-AVHRR در تحلیل خشک‌سالی‌های منطقه، مجله‌ی تحقیقات مرتع و بیابان، شماره‌ی ۳، صص ۴۴۵-۴۶۵.
- (۴) صلاحی برومند، ولیزاده کامران خلیل، قویدل رحیمی یوسف، ۱۳۸۶، شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش تبریز در شرایط دو برابر شدن دی اکسید کربن جو با استفاده از مدل گردش عمومی GISS، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره‌ی ۶۲، صص ۵۵-۶۶.
- (۵) عباسی فاطمه، بابائیان ایمان، حبیبی نوخندان مجید، گلی مختاری لیلا، ملبوسی شراره، عسکری شمس‌الله، (۱۳۸۹)، ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش ایران در دهه‌های آینده، با کمک مدل MAGICC-SCENGEN، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره‌ی ۷۳، صص ۹۱-۱۰۹.
- (۶) قویدل رحیمی یوسف، (۱۳۸۹)، آشکارسازی آماری اثر گرمایش جهانی بر ناهنجاری‌های بارش سالانه‌ی جلفا با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مجله‌ی جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲/۳۸، صص ۶۵-۸۲.
- (۷) خورشید دوست علی محمد، قویدل رحیمی یوسف، (۱۳۸۵)، شبیه‌سازی آثار دو برابر شدن دی اکسید کربن جو بر تغییر اقلیم تبریز با استفاده از مدل آزمایشگاه پویایی سیالات ژئوفیزیکی (GFDL)، مجله‌ی محیط‌شناسی، شماره‌ی ۳۹، صص ۱-۱۰.
- (۸) خوش اخلاق فرامرز. حجازی زاده زهرا. محمدی حسین. روشن غلامرضا، (۱۳۸۴)، رویکردی از روش TOPSIS در تعیین و رتبه‌بندی خشک‌سالی، مجله‌ی علوم جغرافیایی، شماره‌ی ۶ و ۷، صص ۱۰۵-۱۲۷.
- (۹) عزیززاده امین، آشگر طوسی شادی، (۱۳۸۶)، توسعه‌ی یک مدل برای پایش و پیش‌بینی خشک‌سالی، (مطالعه‌ی موردی استان خراسان رضوی)، مجله‌ی علوم و صنایع کشاورزی، شماره‌ی ۱، صص ۲۲۳-۲۳۳.
- (۱۰) گل محمدی مریم، مساحی بوانی علیرضا، (۱۳۸۹)، بررسی تغییرات شدت و دوره‌ی بازگشت خشک‌سالی حوضه‌ی قره‌سو در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه‌ی آب و خاک، شماره‌ی ۲، صص ۳۱۵-۳۲۶.
- (۱۱) محمدی حسین. مقبل معصومه. رنجبر فیروز، (۱۳۸۹)، مطالعه‌ی تغییرات بارش و دمای ایران با استفاده از مدل MAGICC SCENGEN، مجله‌ی جغرافیا، شماره‌ی ۲۵، صص ۱۲۵-۱۴۲.

(12) Andersson, L., Wilk, J., Martin C., Todd, Denis A., Hughes, Earle, A., Kniveton, D., Layberry, R., Hubert, Savenije, H.G., (2006). *Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River*, Journal of Hydrology. 331, 43- 57.

(13) Ashok, K. Mishra, Vijay, P. Singh, (2010). *A review of drought concepts*, Journal of Hydrology 391, 202-216

(14) Bhalme, H.N., Mooley, D.A., (1980). *Large scale drought/floods and monsoon circulation*. Monthly Weather Review 108, 1197.

- (15) Blenkinsop S., H.J. Fowler, (2007), *Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models*, *Journal of Hydrology*. 342, 50–71
- (16) Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A., (2003). *Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily*. *Water Resources Management* 17, 273–296.
- (17) Edmond Pasho, J. Julio Camarero, Martin de Luis, Sergio M. Vicente-Serrano, (2011). *Impacts of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1800–1811
- (18) Elsa E. Moreira, Ana A. Paulo, Luí's S. Pereira, Joaõ T. Mexia, (2006), *Analysis of SPI drought class transitions using loglinear model*, *Journal of Hydrology*, 331, 349–359.
- (19) H.R. Moradi, M. Rajabi, M. Faragzadeh, (2010), *Investigation of meteorological drought characteristics in Fars province, Iran*, *Catena* 84, 35–46.
- (20) Hoogwijk M., Faaij A., Vries B., Turkenburg W., (2009). *Exploration of regional and global cost-supply curves of biomass energy from short-rotation crop sat abandoned cropland Andres land under four IPCC SRES land-use scenarios*, *Biomass and Bioenergy*. 33, 26–43.
- (21) Justin Sheffield Eric F. Wood, (2008), *projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations*. *Clim Dyn J*. 31, 79–105
- (22) McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scales*. In: *Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology*, January 17e22, Anaheim, California, pp. 179e184
- (23) Nigel W. Arnell, (2004). *Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios*, *Global Environmental Change* 14, 31–52
- (24) Palmer, W.C., (1965). *Meteorological drought*. Research Paper No. 45, US Weather Bureau, Washington, DC.
- (25) Parry, M., (2004). *Global impacts of climate change under the SRES scenarios*, *Global Environmental Change*. 14:1.
- (26) Paulo, A.A., Pereira, L.S., (2006a). *Drought concepts and characterization. Comparing drought indices applied at local and regional scales*. *Water International* 31, 37–49.
- (27) Paulo, A.A., Pereira, L.S., Matias, P.G., (2003). *Analysis of local and regional droughts in southern Portugal using the theory of runs and the Standardized Precipitation Index*. *Kluwer, Dordrecht*, pp. 55–78.
- (28) Roshan, Gh. R., Ranjbar, F., Orosa, J. A., (2010). *Simulation of global warming effect on outdoor thermal comfort conditions*. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7, 571-580.
- (29) Rounsevell, M.D.A., Ewert, F., Reginster, I., Leemans, R., Carter, T.R., (2005). *Future scenarios of European agricultural land use II. Projecting changes in cropland and grassland, Agriculture, Ecosystems and Environment*. 10. 117–135.
- (30) Roshan Gh. R., F. Khoshakh lagh, Gh. Azizi, H. Mohammadi, *SIMULATION OF TEMPERATURE CHANGES IN IRAN UNDER THE ATMOSPHERE CARBON DIOXIDE DUPLICATION CONDITION*, *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 139-15
- (31) Sastri, A.S.R.A.S., (1993). *Agricultural drought management strategies to alleviate impacts: examples from the arid and sub humid regions of the Indian Subcontinent*. In: Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 65e86.

- (32) Wigley, T.M.L., (1993), *Balancing the Carbon Budget, Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes*. *Tellus* 45B, 409-425.
- (33) Wigley, T.M.L., (1994a). *The Contribution from Emissions of Different Gases to the Enhanced Greenhouse Effect, (In) Climate Change and the Agenda for Research* (ed.T. Hanisch), Westview Press, Boulder, CO, 193-222.
- (34) Wigley, T.M.L., Jain, A., Joos, F., Shukla, P.R. and Nyenzi, B.S., (1997a). *Implications of Proposed CO2 Emissions limitations, IPCC Technical Paper 4* (eds. J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs and M. Noguer), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, pp. 41.
- (35) Wigley, T.M.L., Raper, S.C.B., Hulme, M. and Smith, S., (2000). *The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4, Technical Manual*, Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, pp. 2-48.