

بررسی تغییرات مکانی-زمانی بارش و دمای ایران تحت شرایط تغییر اقلیم با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار

مهدی دلغندی^{۱*}، روزبه مؤذن‌زاده^۲

۱ و ۲. استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۷/۰۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۹/۲۶)

چکیده

تأثیرات تغییر اقلیم بر دما و به‌ویژه بارش سراسر جهان به‌دلیل پیچیدگی و تغییرات مکانی آنها به‌خوبی شناخته نشده است. در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر بارش و دمای ایران، ۱۵ مدل AOGCM استفاده شدند که تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای A1B، A2 و B1 اجرا می‌شوند. همچنین بارش و دمای ماهانه برای ۲۱ ایستگاه سینوپتیک در دو دوره آتی (۲۰۱۶-۲۰۴۵ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹)، تحت هر سه سناریوی انتشار محاسبه شد. نتایج نشان داد در هر دو دوره آتی، افزایش دما در ماه‌های تابستان نسبت به ماه‌های زمستان بیشتر است. در دوره آتی نخست هر سه سناریوی انتشار افزایش دمای یکسانی (حدود ۱ تا ۱/۵ درجه) را پیش‌بینی می‌کنند و تغییرات بارش در این دوره در ایستگاه‌های مختلف چشمگیر نیست؛ اما در دوره آتی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ سناریوی A2 بیشترین افزایش دما و سناریوی B1 کمترین افزایش دما را پیش‌بینی می‌کنند. در این دوره انتظار می‌رود تحت سناریوی بحرانی A2 دمای متوسط سالانه کشور در مناطق مرکزی و حاشیه دریای خزر حدود ۳/۵ درجه سانتی‌گراد و در دیگر مناطق تا حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. همچنین مشخص شد در دوره آتی دوم تحت سناریوی بحرانی A2 فقط در استان گیلان و تا حدودی استان اردبیل افزایش بارش خواهیم داشت و در دیگر مناطق کشور شاهد کاهش بارندگی خواهیم بود. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که در دوره آتی نخست حجم بارش سالانه کل کشور حدود ۱/۰۲ میلیارد مترمکعب (حدود ۰/۲۵ درصد) و در دوره آتی دوم حدود ۱۶/۵۲ میلیارد مترمکعب (حدود ۴/۱۳ درصد) کاهش خواهد یافت.

کلیدواژگان: بارش، تغییر اقلیم، دما، سناریوهای انتشار.

مقدمه

واژه اقلیم مفهومی احساسی است و می‌توان آن را متوسط وضعیت هوا در یک منطقه دانست. اقلیم منطقه برخلاف آب و هوای آن منطقه، معمولاً با دو پارامتر دما و بارش سنجیده می‌شود که بیانگر اهمیت زیاد این دو پارامتر است. گرم‌شدن جهان ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای (به‌ویژه دی‌اکسید کربن) در دهه‌های اخیر که از آن به‌عنوان تغییر اقلیم یاد می‌شود، سبب تغییر در الگوی پارامترهای هواشناسی شده است. این گازها به‌دلیل عبور دادن نور خورشید که طول موج کوتاه دارد و عبور ندادن بازتابش آن که به‌صورت طول موج بلند است، موجب افزایش دمای اتمسفر شده است (۱ و ۲). تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌هایی تأثیرگذار است که به‌نوعی با اقلیم در ارتباط‌اند. تأثیرات تغییر اقلیم به دو گروه کلی تقسیم می‌شود. گروه نخست؛ تأثیرات بیوفیزیکی شامل افزایش سطح دریا، افزایش تعداد و میزان رخدادهای حدی مانند سیلاب و خشکسالی (۳)؛ تغییر در کیفیت و کمیت منابع آب و خاک، افزایش علف‌های هرز و آفات گیاهی، تأثیرات فیزیولوژیکی روی گیاهان، مراتع و جنگل‌ها و گروه دوم؛ تأثیرات اجتماعی-اقتصادی تغییر اقلیم شامل کاهش تولیدات زراعی، نوسانات در قیمت بازارهای جهانی، تغییرات در توزیع ژئوگرافیکی رژیم‌های دادوستد، افزایش ریسک گرسنگی بشر، کاهش امنیت غذایی و مهاجرت هستند (۴).

در حال حاضر بهترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های جفت‌شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو^۱ (AOGCM) هستند. این مدل‌ها برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی به سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای^۲ (GHGs) نیاز دارند. هنگامی که در مطالعات تغییر اقلیم از چندین مدل اقلیم (مانند مدل‌های AOGCM) یا مدل اثر (مانند مدل‌های گیاهی و هیدرولوژیکی) استفاده شود و یا در استفاده از این مدل‌ها فرضیه‌ها (مانند سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای) و روش‌های مختلفی به‌کار گرفته شوند، مبحث عدم قطعیت نیز مطرح می‌شود (۵). بنابراین، در تولید سناریوهای تغییر اقلیم و نیز بررسی تأثیرات تغییر اقلیم، باید عدم قطعیت‌های موجود نیز در نظر گرفته شوند. گزارش چهارم هیئت بین دول تغییر اقلیم^۳، بیان کرده است که بر اثر تغییر

اقلیم، متوسط دمای اتمسفر تا پایان قرن جاری بسته به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۱/۸ تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (۶). همچنین تغییر اقلیم سبب تغییر در الگوی بارش‌ها به‌ویژه بارش‌های حدی خواهد شد (۷). مطالعات صورت‌گرفته نشان می‌دهد تغییرات دما و بارش در سراسر کره زمین رخ می‌دهد. بدین‌منظور مطالعه‌ای که در منطقه شاهرود انجام شده است نشان می‌دهد تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1، دمای منطقه حدود ۱/۵ درجه در ۳۰ سال آینده افزایش خواهد یافت (۸). تاپیادور^۴ و همکارانش (۹) با استفاده از چند مدل اقلیمی منطقه‌ای (RCM) دریافتند که در دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰، منطقه پنیسولا واقع در جنوب غربی اروپا از نظر بارندگی خشک‌تر خواهد شد. پاراچو^۵ و همکارانش (۱۰) برای همین منطقه با استفاده از مدل‌های AOGCM و RCM و سناریوی انتشار A1B، سناریوهای بارش را در دو دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و ۲۰۶۹-۲۰۹۸ تعیین کردند و گفتند که بارش منطقه مطالعه‌شده کاهش خواهد یافت. در این منطقه رودریگز^۶ و همکارانش (۱۱) نیز نتایج مشابهی به‌دست آوردند. ترامبلی^۷ و همکارانش (۱۲) با استفاده از ۱۵ مدل RCM به این نتیجه رسیدند که تعداد بارش‌های حدی مَرَاکَش در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹، ۱۲ درصد کاهش خواهد یافت، اما برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ نتایج مدل‌های مختلف تفاوت زیادی با یکدیگر داشتند. وو و همکارانش (۱۳) نوعی آنالیز مکانی و زمانی از روند بارندگی برای حوضه‌ای در چین در شرایط تغییر اقلیم انجام دادند و حساسیت مناطق مختلف به تغییر اقلیم را به‌دست آوردند و نتیجه گرفتند که بارش سالانه در مناطق شمالی حوضه افزایش و در مناطق جنوبی کاهش خواهد یافت. همچنین مطالعه‌ای در بلژیک نشان داد که چارک‌های بارش حدی، تا پایان قرن جاری، حدود ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت و این امر به افزایش دوبرابری بارش تابستانه منجر خواهد شد (۱۴). همچنین با استفاده از مدل CMIP3 برای آسیای مرکزی، افزایش دما در تابستان و بهار و افزایش بارش تابستانه پیش‌بینی شده است (۱۵). برای استرالیا نیز پیش‌بینی شده است که طی سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۹۰، دما ۱/۱ تا ۲/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد که این امر به افزایش ۱۵ درصدی تبخیر از مخازن بزرگ منجر خواهد شد (۱۶) افزایش دمای

4. Tapiador
5. Parracho
6. Rodríguez
7. Tramblay

1. AOGCM: Atmosphere- Ocean General Circulation Model
2. Greenhouse Gases Scenarios
3. IPCC: Intergovernmental Panel of Climate Change

به ترتیب حدود ۱۵ و ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت. تحقیقات در حوضه رودخانه بار نیشابور [۲۷]، حوضه سیروان [۲۸] و کرمانشاه [۲۹] نیز بیانگر کاهش بارش و افزایش دما در این مناطق است.

بارندگی به‌عنوان پارامتری کلیدی در اقلیم منطقه، می‌تواند اهمیت زیادی بر فعالیت انسانی (مانند کشاورزی، منابع آب و ...) و نیز بلایای طبیعی (مانند خشکسالی و سیلاب) داشته باشد. با وجود این، تغییرات اقلیمی بارندگی به دلیل پیچیدگی و تغییرات مکانی آن به خوبی شناخته نشده است [۳۰]. از طرفی، با بررسی مطالعات صورت گرفته در سطح دنیا و ایران می‌توان گفت که دما در آینده، تحت تأثیر تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت، ولی مقدار آن برای همه مناطق یکسان نخواهد بود و تغییرات بارندگی پیچیده‌تر از تغییرات دمایی است و در برخی مناطق بارندگی تحت تأثیر تغییر اقلیم کاهش و در برخی مناطق دیگر، افزایش می‌یابد. علاوه بر تغییرات مکانی نامنظم، تغییرات زمانی بارش نیز از روند خاصی پیروی نمی‌کند. از طرفی، تحقیقی جامع صورت نگرفته است که تغییرات بارش و دما را در کل ایران بررسی کند و در تحقیقات صورت گرفته نیز عدم قطعیت مدل‌های AOGCM کمتر دیده شده است. بنابراین، با توجه به وابستگی شدید اقلیم و منابع آب به دو پارامتر بارش و دما، این مهم انگیزه‌ای برای انجام تحقیق حاضر شد. بدین منظور با استفاده از ۱۵ مدل AOGCM و سه سناریوی A2، A1B و B1، سناریوهای بارش و دما در دو دوره آتی ۲۰۱۶-۲۰۴۵ و ۲۰۷۱-۲۰۹۹ برای ۲۱ شهر ایران محاسبه شد تا وضعیت دمایی و بارش کشور در دوره‌های آتی مشخص شود.

مواد و روش‌ها

ایران با مساحت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع تقریباً بین عرض‌های شمالی ۲۵ تا ۴۰ درجه و طول‌های شرقی ۴۴ تا ۶۴ درجه قرار دارد. از نظر عرض جغرافیایی، بخش‌های جنوبی ایران در نواحی نسبتاً گرم و بخش‌های شمالی آن در نواحی نیمه‌گرم تا نسبتاً سرد واقع است [۳۱]. در این تحقیق از آمار داده‌های هواشناسی ۲۱ ایستگاه سینوپتیک کشور استفاده شده است. در انتخاب ایستگاه‌ها معیارهایی چون وجود آمار طولانی‌مدت، نواقص کم‌آماری و پراکنش مکانی مناسب در نظر گرفته شد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های مطالعه‌شده را نشان می‌دهد.

ناشی از تغییر اقلیم برای اسپانیا تحت سه سناریوی A2، A1B و B1 تا پایان قرن حاضر به ترتیب ۳/۷۵، ۳/۳ و ۲/۱ تعیین شده و گفته شده است که تغییرات بارش از روند خاصی پیروی نمی‌کند، اما طبق سناریوهای مختلف، میزان بارش ۴/۵ تا ۵/۵ درصد کاهش خواهد یافت [۱۷]. المزرایی و همکارانش [۱۸] با استفاده از نوعی مدل GCM (مدل CMIP3) تحت سه سناریوی انتشار A2، A1B و B1، پیش‌بینی کردند که تا پایان قرن جاری، مناطق شمالی شبه‌جزیره عربستان نسبت به مناطق جنوبی افزایش دمای بیشتری را شاهد خواهند بود. همچنین مشخص شد که بارش در مناطق شمالی و جنوبی عربستان حدود ۱/۵ درصد برای هر دهه به ترتیب کاهش و افزایش خواهد یافت. گولاچا و مولانگو [۱۹] با در نظر گرفتن دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ به‌عنوان دوره پایه، تغییرات دما و بارش ناشی از تغییر اقلیم را برای حوضه یک رودخانه در تانزانیا به‌دست آوردند. بدین‌منظور از مدل HadCM3 تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 استفاده شد و این نتیجه به دست آمد که بیشترین دمای مناطق مختلف حوضه ۰/۲ تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. در مطالعه‌ای دیگر با استفاده از آنالیز خوشه‌ای K-Means و مدل CMIP5 تغییرات دما و بارش در اروپا تحت شرایط تغییر اقلیم برای دوره ۲۰۱۰-۲۰۸۰ به‌دست آمد [۲۰]. علاوه بر این مطالعات، گنکالوز و همکارانش [۲۱] (با استفاده از سناریوی A1B) و پیراس و همکارانش [۲۲] تأثیرات تغییر اقلیم بر دما و بارش را به ترتیب برای شبه‌جزیره ایبری و منطقه ساردینای ایتالیا مطالعه کردند. مطالعاتی نیز در این زمینه در کشور صورت گرفته است. کوهستانی و همکارانش [۲۳] کاهش بارش را با استفاده از مدل CMIP5 برای حوضه زاینده‌رود تحت تأثیر تغییر اقلیم پیش‌بینی کردند. حمیدیان‌پور و همکارانش [۲۴] نیز تغییرات دما و بارش را برای شرق ایران با استفاده از سه سناریوی A2، A1B و B1 بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر افزایش دما در همه ایستگاه‌ها بود. همچنین گفته شد که بارش فصول سرد سال نیز در این منطقه افزایش خواهد یافت و باید در سال‌های آینده منتظر وقوع سیلاب‌های بهاره شدیدتر باشیم. در ایستگاه رشت نیز افزایش ۱/۳ تا ۲ درجه‌ای برای بیشترین دما و نیز افزایش بارش تحت دو سناریوی A2 و A1B برای دوره ۲۰۴۳-۲۰۷۲ پیش‌بینی شده است [۲۵]. مطالعه رضایی و همکارانش [۲۶] نیز نشان داد مقدار بارش سالانه ایستگاه سعادت‌آباد سیرجان و چترود تحت سناریوی A2 و B2 تا پایان قرن جاری

جدول ۱. موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های مطالعه‌شده

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	*P	*T	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	*P	*T
بندرعباس	۲۷° ۱۲'	۴۹° ۳۶'	۱۳۶	۲۷/۲	کرمانشاه	۳۴° ۲۴'	۴۷° ۱۲'	۴۳۷	۱۳/۳
بیرجند	۳۲° ۵۴'	۵۹° ۱۸'	۱۲۹	۱۷	ارومیه	۳۷° ۴۲'	۴۵° ۰۶'	۳۹۰	۱۱/۶
بوشهر	۲۹° ۰۰'	۵۰° ۴۸'	۲۱۶	۲۴/۲	سنندج	۳۵° ۱۸'	۴۷° ۰۰'	۴۹۲	۱۲/۸
بم	۲۹° ۰۶'	۵۸° ۲۱'	۷۲	۲۱/۷	شهرکرد	۳۲° ۱۸'	۵۰° ۴۸'	۲۶۶	۱۲/۱
بندر انزلی	۳۷° ۲۸'	۴۹° ۲۸'	۱۸۵۳	۱۶/۲	شیراز	۲۹° ۳۶'	۵۲° ۳۶'	۳۱۶	۱۶/۸
کرمان	۳۰° ۱۸'	۵۷° ۰۰'	۱۵۳	۱۶	تبریز	۳۸° ۰۶'	۴۶° ۱۲'	۳۱۸	۱۱/۶
سبزوار	۳۶° ۱۲'	۵۷° ۴۲'	۱۶۹	۱۶/۱	تربت حیدریه	۳۵° ۱۸'	۵۹° ۱۲'	۲۳۶	۱۴/۲
سمنان	۳۵° ۳۵'	۵۳° ۳۳'	۱۳۹	۱۸/۲	طبس	۳۳° ۳۶'	۵۶° ۵۵'	۷۷	۲۱/۲
تهران	۳۵° ۴۲'	۵۱° ۱۸'	۲۲۰	۱۶/۴	کاشان	۳۷° ۲۸'	۴۹° ۲۸'	۱۳۸	۱۹/۵
یزد	۳۱° ۵۴'	۵۴° ۱۸'	۵۵	۱۸/۹	گرگان	۳۶° ۵۱'	۵۴° ۱۶'	۵۱۱	۱۳/۴
اراک	۳۴° ۰۶'	۴۹° ۴۸'	۳۱۶	۱۱/۸					

*P و T به ترتیب دمای میانگین سالانه (درجه سانتی‌گراد) و مجموع بارش سالانه (mm) هستند.

دوره‌های ۲۰۷۰-۲۰۹۹ و ۲۰۱۶-۲۰۴۵ به‌عنوان دوره‌های آتی انتخاب شدند. یکی از ورودی‌های این مدل‌ها، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این تحقیق از خروجی ۱۵ مدل CHAM5/MPI-HadCm3، CNRM-CM3، GFDL-CM2.0، CSIRO-MK3.5، OMIPSL، MRI-CGM2.3.2a، GISS-R، CGCM3(T63)، MIROC3.2 mdrs و BCM2.0، CHO-G، CM4 استفاده شد که تحت سه سناریوی انتشار A2، A1B و B1 (بحرانی‌ترین، حد متوسط و کمترین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای) داده‌های اقلیمی را شبیه‌سازی می‌کنند.

برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل AOGCM، مقادیر «اختلاف» برای دما (رابطه ۱) و «نسبت» برای بارندگی (رابطه ۲) بین میانگین ۳۰ ساله در دوره‌های آتی (۲۰۱۶-۲۰۴۵ یا ۲۰۷۰-۲۰۹۹) و دوره شبیه‌سازی‌شده پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۰) توسط همان مدل، محاسبه می‌شود. این مقادیر بیانگر میزان میانگین ۳۰ ساله تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه است.

$$\Delta T_i = T_{fut_i} - T_{base_i} \quad (1)$$

$$\Delta P_i = \frac{P_{fut_i}}{P_{base_i}} \quad (2)$$

تولید سناریوهای اقلیمی دما و بارش ماهانه برای دوره‌های آتی

در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های سه‌بعدی جفت‌شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو (AOGCM) هستند [۳۲]. مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی، وجود اختلاف در نوسانات متغیر مطالعه‌شده را تأیید می‌کند. از طرفی، مقایسه میانگین بلندمدت این متغیرها با داده‌های مشاهداتی بیانگر توانایی زیاد این مدل‌ها در شبیه‌سازی میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی است. بنابراین، معمولاً به‌جای استفاده مستقیم از داده‌های AOGCM در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌های این داده‌ها استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد بهترین طول دوره آماری ۳۰ سال است. سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد کرده است که به‌منظور هماهنگی در انتخاب دوره پایه در مطالعات مختلف تغییر اقلیم و امکان مقایسه آنها، دوره پایه ۱۹۶۱-۱۹۹۰ در نظر گرفته شود. از طرف دیگر، به توصیه همین سازمان، در مواردی که داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های منطقه مطالعه‌شده برای این دوره موجود نباشد، دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ جایگزین شود [۳۳]. بنابراین، با توجه به موجودی آمار متغیرهای اقلیمی ایستگاه‌های مطالعه‌شده دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به‌عنوان دوره پایه و نیز

یافته‌ها

میانگین تغییرات دما و بارش کشور در مقیاس ماهانه با استفاده از روابط ۱ و ۲ تغییرات دما (ΔT) و بارش (ΔP) در دوره‌های آتی نخست (۲۰۱۶-۲۰۴۵) و دوم (۲۰۷۰-۲۰۹۹) نسبت به دوره گذشته برای هر مدل AOGCM و هر ماه، تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 برای شهرهای مطالعه شده محاسبه شد. برای بررسی تغییرات دما و بارش کشور در شرایط تغییر اقلیم، با توجه به وجود ۱۵ مدل AOGCM و ۲۱ شهر برای هر ماه، تحت هر یک از سناریوهای انتشار، ۳۱۵ داده ΔT و ΔP به دست آمد که با میانگین‌گیری از این ۳۱۵ داده، متوسط ΔT و ΔP برای دوره‌های آتی و سناریوهای انتشار تعیین و در شکل‌های ۱ و ۲ ارائه شد. در هر یک از این دو شکل، شش نمودار ترسیم شده است که هر یک از نمودارها مختص به یک دوره آتی و یک سناریوی انتشار است. برای نشان دادن دوره آتی از عدد میانه مختص به هر دوره (۲۰۲۵ و ۲۰۸۵) استفاده شده است. به منظور نمایش پراکندگی این ۳۱۵ داده، نمودار جعبه‌ای مختص به ΔT ماهانه دوره آتی اول، تحت سناریوی A1B به عنوان نمونه ارائه شده است (شکل ۳). در این شکل علاوه بر مشخص بودن چارک‌های اول تا چهارم، دهک ۰/۱ و ۰/۹ نیز با ستاره مشخص شده است. پراکندگی مقادیر ΔT کل کشور در ماه‌های مختلف (شکل ۳) ناشی از دو عامل بوده است: ۱. اختلاف نتایج مدل‌های AOGCM و ۲. اختلاف نتایج شهرها. چرا که در تعیین پراکندگی مقادیر ΔT ماهانه کشور از داده‌های ΔT ماهانه کل شهرهای کشور (۲۱ شهر) استفاده شده است که با استفاده از ۱۵ مدل AOGCM به دست آمده است (در مجموع ۳۱۵ داده). نتایج نشان داد مقادیر ΔT به دست آمده از هر یک از مدل‌های AOGCM برای شهرهای مختلف اختلاف چندانی نداشتند، ولی مقادیر ΔT به دست آمده از مدل‌های مختلف AOGCM با یکدیگر اختلاف بیشتری داشتند. از این‌رو، می‌توان گفت که پراکندگی موجود در مقادیر ΔT ماهانه، بیشتر ناشی از عدم قطعیت مدل‌های AOGCM است.

که ΔT و ΔP_i به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مختص به دما و بارندگی برای میانگین بلندمدت ۳۰ ساله برای هر ماه ($1 \leq i \leq 12$)، میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه، T_{base_i} میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه است. برای بارندگی نیز موارد یاد شده برقرار است.

ریز مقیاس نمایی

یکی از روش‌های ریزمقیاس کردن داده‌ها به لحاظ مکانی، روش تناسبی (عامل تغییر) است. در این روش، سناریوهای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM (مقادیر ΔT و ΔP) طبق رابطه‌های ۳ و ۴ ریزمقیاس می‌شوند.

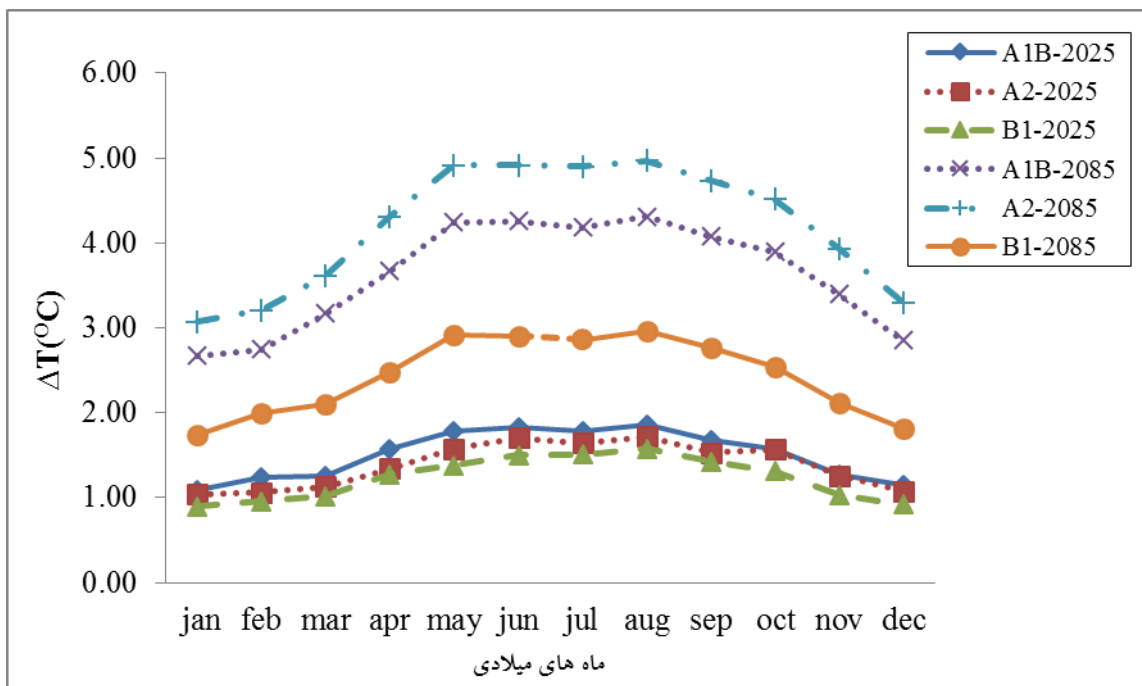
$$T = T_{base} + \Delta T \quad (3)$$

$$P = P_{base} \times \Delta P \quad (4)$$

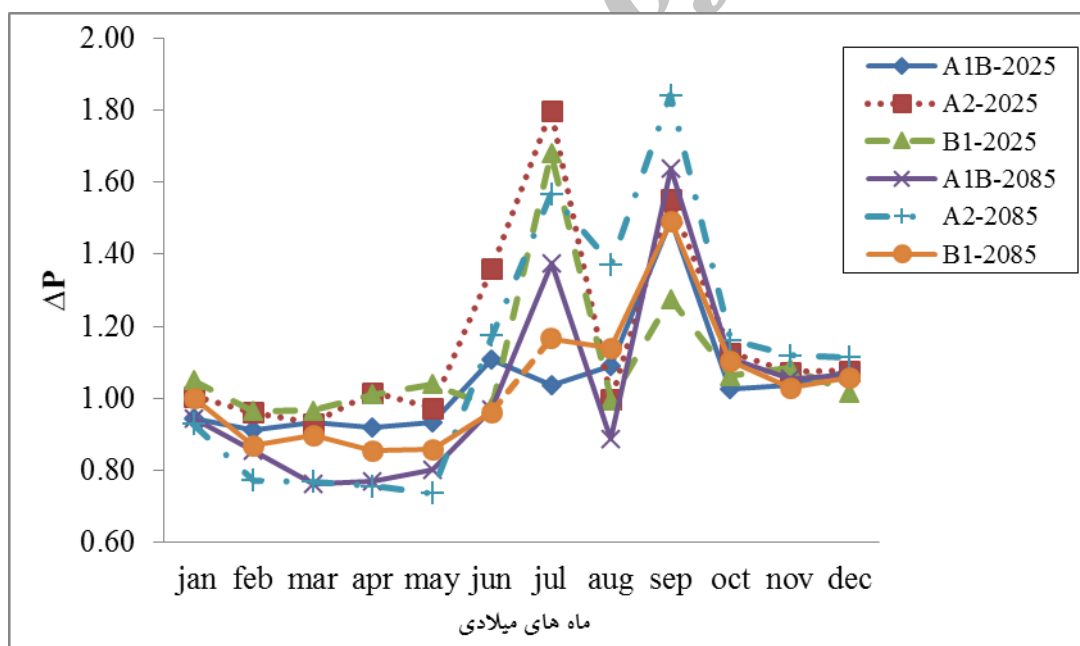
در این دو رابطه، T_{base} دمای ماهانه مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و T دمای تولیدی از پدیده تغییر اقلیم برای دوره آتی هستند و ΔT نیز در بخش قبلی توضیح داده شده است. برای بارندگی (P) نیز موارد یاد شده برقرار است.

در مطالعات مختص به تغییر اقلیم، در نظر گرفتن همه منابع عدم قطعیت به سادگی امکان‌پذیر نیست. از طرفی، مطالعاتی که در زمینه تأثیرات تغییر اقلیم صورت گرفته است، اهمیت بیشتر منابع عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به بقیه منابع عدم قطعیت را نشان می‌دهد [۳۴]. در این تحقیق با توجه به اهمیت عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، عدم قطعیت این دو منبع بررسی شد.

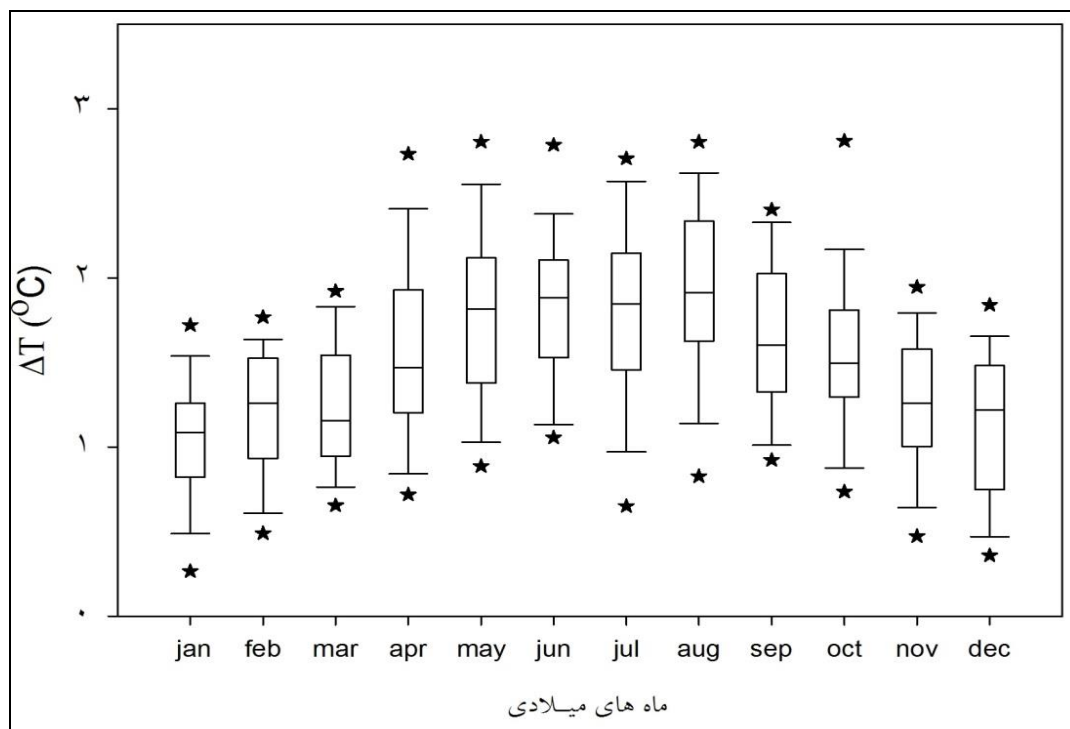
برای تولید سناریوهای اقلیمی روزانه، مقادیر ΔT و ΔP (معدلات ۱ و ۲) برای هر مدل AOGCM تحت هر یک از سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 و برای هر ماه و هر دو دوره آتی جداگانه محاسبه شد. به بیان دیگر، برای تولید سناریوی اقلیمی هر شهر، در هر دوره آتی، تحت هر سناریوی انتشار، برای هر ماه ۱۵ مدل ΔT و ΔP محاسبه شد.



شکل ۱. متوسط تغییرات دما (ΔT) تحت سناریوهای مختلف انتشار در دو دوره آبی نسبت به دوره پایه



شکل ۲. متوسط نسبت بارش در دو دوره آبی تحت سناریوهای مختلف انتشار به بارش دوره پایه (ΔP)



شکل ۳. نمودار جعبه‌ای تغییرات دما (ΔT) در دوره آبی ۲۰۱۶-۲۰۴۵ تحت سناریوی A1B

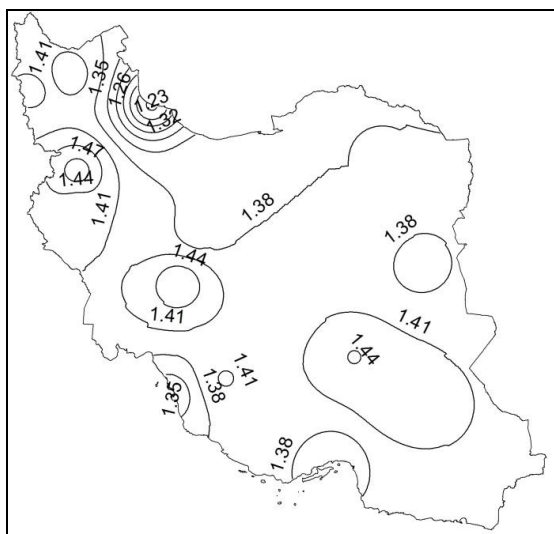
آبی دوم (پایان قرن جاری)، میزان انتشار CO_2 تحت سه سناریوی A2، A1B و B1 به ترتیب برابر ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۵۰ ppm خواهد بود [۶]. در این سه سناریو طبق نمودار شکل ۱، در دوره آبی دوم تحت سناریوی A2 افزایش دما در ماه‌های گرم سال به حدود ۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که در صورت رخ دادن چنین افزایش دمایی، زندگی در مناطق گرمسیری کشور به خصوص شهرهای حاشیه خلیج فارس دچار چالش اساسی خواهد شد. به طوری که زندگی در ماه‌های گرم سال در این مناطق اگر غیرممکن نباشد، بسیار طاقت‌فرسا خواهد بود. تحت سناریوی B1، افزایش دما در ماه‌های گرم سال حدود ۲/۵ درجه و تحت سناریوی A1B به حدود ۴ درجه خواهد بود.

درباره تغییرات متوسط بارش کشور در ماه‌های مختلف می‌توان گفت که در دوره‌های آبی بارش‌های زمستانه و بهاره کاهش و بارش‌های تابستانه و پاییزه افزایش خواهد یافت (شکل ۲)؛ که این افزایش بارش‌های تابستانه و پاییزه و کاهش بارش‌های زمستانه و بهاره با نزدیک شدن به پایان قرن، بیشتر می‌شود. درباره افزایش بارش‌های تابستانه (ΔP) باید گفت که مقادیر ΔP ارائه شده در شکل ۲، میانگین ΔP شهرهای مختلف است؛ از آنجا که بارش‌های تابستانه کشور اندک است بنابراین مقدار عددی افزایش بارش که حاصل

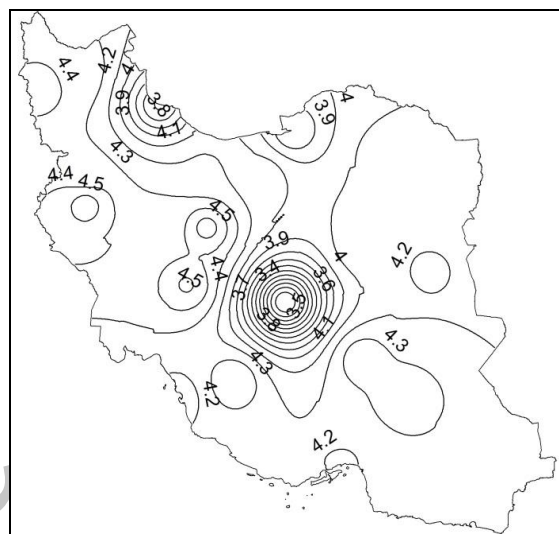
همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است در هر دو دوره آبی، افزایش دمای متوسط کشور در ماه‌های گرم سال نسبت به ماه‌های سرد سال بیشتر است. با توجه به اینکه افزایش دما سبب افزایش تبخیر و تعرق می‌شود، بنابراین افزایش دما به افزایش تقاضای آب به‌ویژه در بخش کشاورزی (بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب) منجر می‌شود. این مسئله وقتی حادتر می‌شود که می‌بینیم در فصل تابستان که همراه با پیک تقاضای آب است افزایش دما و در نتیجه تقاضای آب بیشتری خواهیم داشت. نکته دیگر اینکه در دوره آبی نخست، سه سناریوی انتشار، افزایش دمای یکسانی (در ماه‌های گرم و سرد به ترتیب حدود ۱/۵ و ۱ درجه سانتی‌گراد) را پیش‌بینی می‌کنند، اما این مطلب درباره دوره آبی دوم متفاوت است. در این دوره، سناریوی بدبینانه A2 و خوش‌بینانه B1 به ترتیب بیشترین و کمترین افزایش دما را پیش‌بینی می‌کنند. سناریوی A1B نیز حد واسطی از این دو سناریو است. دلیل این امر نیز به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در این سناریوها برمی‌گردد. براساس گزارش IPCC، تا سال ۲۰۵۰ میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای که مهم‌ترین آنها CO_2 است تحت هر سه سناریو تقریباً مشابه خواهد بود (برای سناریوی B1، حدود ۵۲۰ و برای دو سناریوی دیگر حدود ۵۷۰ ppm). اما در پایان دوره

تغییرات مکانی متوسط دما و بارش سالانه کشور برای بررسی تغییرات مکانی بارش و دما در سطح کشور، سناریوی بدینانه A2 (وخیم ترین سناریو) انتخاب شد و خطوط کنتور مختص به تغییرات متوسط دما و بارش سالانه کشور توسط نرم افزار ArcMap در دو دوره آتی اول و دوم ترسیم شدند (شکل های ۴ و ۵). در ترسیم این نقشه ها از میانگین تغییرات بارش و دمای به دست آمده از مدل AOGCM برای شهرهای مطالعه شده استفاده شد.

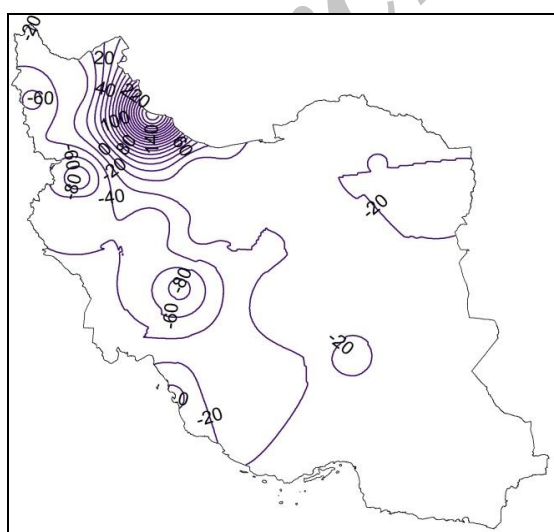
ضرب ΔP در مقدار بارش تابستانه دوره گذشته هر شهر است، چشمگیر نخواهد بود. علاوه بر این، شهرهایی مانند بم و یزد که بارش های تابستانه بسیار ناچیزی دارند، دارای ΔP تابستانه زیادی هستند که این امر سبب افزایش ΔP تابستانه کشور شده است؛ اما در حقیقت از نظر عددی بارش های تابستانه افزایش چشمگیری نخواهد داشت. همچنین با توجه به این شکل مشخص می شود که به طور کلی سناریوی A2 نسبت به A1B و A1B نسبت به B1 کاهش بارش زمستانه و بهاره بیشتر و افزایش بارش پاییزه بیشتری را پیش بینی می کند.



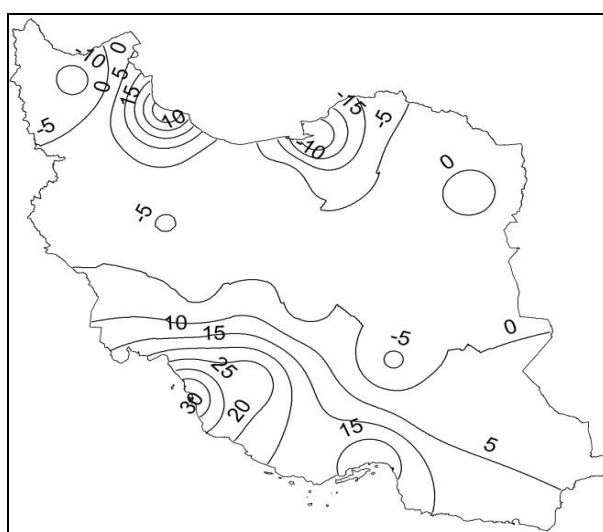
شکل ۴. ب) خطوط کنتور تغییرات دمای متوسط سالانه (°C) در دوره آتی دوم تحت سناریوی A2



شکل ۴. الف) خطوط کنتور تغییرات دمای متوسط سالانه (°C) در دوره آتی نخست تحت سناریوی A2



شکل ۵. ب) خطوط کنتور تغییرات بارش سالانه (mm) در دوره آتی دوم تحت سناریوی A2



شکل ۵. الف) خطوط کنتور تغییرات بارش سالانه (mm) در دوره آتی نخست تحت سناریوی A2

یکسانی (در ماه‌های گرم حدود ۱/۵ و در ماه‌های دیگر حدود ۱ درجه سانتی‌گراد) را پیش‌بینی می‌کنند؛ اما در دوره آتی دوم تحت سناریوهای A2، B1 و A1B، دما در ماه‌های گرم سال به ترتیب حدود ۵، ۲/۵ و ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. همچنین مشخص شد در دوره‌های آتی بارش‌های زمستانه و بهاره کاهش و بارش‌های تابستانه و پاییزه افزایش می‌یابد. به‌طور کلی، سناریوی A2 نسبت به A1B و A1B نسبت به B1، کاهش بارش زمستانه و بهاره بیشتری و افزایش بارش پاییزه بیشتری را پیش‌بینی می‌کنند. برای بررسی تغییرات مکانی بارش و دما در سطح کشور از سناریوی بدبینانه A2 (وخیم‌ترین سناریو) استفاده شد و نتایج نشان داد که مقادیر ΔT برای مناطق مختلف کشور به‌ویژه در دوره آتی اول تفاوت چندانی ندارند و کمترین افزایش دما (تحت سناریوی A2) در دوره آتی اول در استان گیلان (حدود ۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین افزایش دما حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد در مناطق مرکزی و غرب کشور رخ خواهد داد. در دوره آتی دوم نیز انتظار داریم که دمای متوسط سالانه کشور حدود ۳/۵ درجه سانتی‌گراد در مناطق مرکزی و حاشیه دریای خزر تا حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد در دیگر مناطق افزایش یابد. درباره تغییرات بارش سالانه نیز باید گفت که میزان افزایش و یا کاهش بارش در دوره آتی اول چشمگیر نیست. اما با نزدیک شدن به پایان قرن تفاوت‌ها چشمگیرتر می‌شود. در دوره آتی دوم تحت سناریوی A2 تنها در استان گیلان و تا حدودی استان اردبیل افزایش بارش خواهیم داشت و در دیگر مناطق کشور شاهد کاهش بارندگی خواهیم بود. این کاهش بارندگی در شرق کشور حدود ۲۰ میلی‌متر و در غرب کشور حدود ۷۰ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود. بنابراین، احتمال دارد تحت سناریوی A2 مناطق کم‌باران ایران، کم‌باران‌تر شوند و خشکسالی‌ها در دوره آتی دوم افزایش یابند. با استفاده از ArcMap میزان تغییرات حجم بارش کشور محاسبه شد و ملاحظه شد که در دوره آتی اول حجم بارش سالانه کل کشور حدود ۱/۰۲ میلیارد مترمکعب و در دوره آتی دوم حدود ۱۶/۵۲ میلیارد مترمکعب کاهش خواهد یافت. با فرض متوسط بارش ۲۴۰ میلی‌متری سالانه کشور، حجم سالانه بارش در کشور حدود ۴۰۰ میلیارد مترمکعب تعیین می‌شود. بنابراین، در دوره آتی اول درصد کاهش حجم بارش سالانه کشور، حدود ۰/۲۵ و در دوره آتی دوم حدود ۰/۲۵ درصد) و در دوره آتی دوم حدود ۱۶/۵۲ میلیارد مترمکعب (حدود ۴/۱۳ درصد) کاهش خواهد یافت.

منابع

- [1]. IPCC. Technical summary. In: Climate change 2001: Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses, eds. Watson, RT, Zinyowera MC, Moss RH, contribution of working group to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge university press, Cambridge. 2001; 1-53.

با توجه به شکل ۴ (الف و ب) مشخص می‌شود که مقادیر ΔT برای مناطق مختلف کشور به‌ویژه در دوره آتی نخست تفاوت چندانی ندارند. کمترین افزایش دما (تحت سناریوی A2) در دوره آتی نخست در استان گیلان (حدود ۱/۲۵ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین افزایش دما حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد در مناطق مرکزی و غرب کشور رخ خواهد داد. در دوره آتی دوم نیز انتظار می‌رود دمای متوسط سالانه کشور حدود ۳/۵ درجه سانتی‌گراد در مناطق مرکزی و حاشیه دریای خزر تا حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد در دیگر مناطق افزایش یابد.

درباره تغییرات بارش سالانه نیز باید گفت که بر اساس شکل (۵-الف)، میزان افزایش و یا کاهش بارش در دوره آتی اول چشمگیر نیست. در مناطق حاشیه خلیج فارس و استان گیلان، افزایش بارش و در دیگر مناطق کاهش ناچیز بارندگی را شاهد خواهیم بود، اما با نزدیک شدن به پایان قرن تفاوت‌ها چشمگیرتر می‌شود. در دوره آتی دوم تحت سناریوی A2 تنها در استان گیلان و تا حدودی استان اردبیل افزایش بارش خواهیم داشت و در دیگر مناطق کشور، شاهد کاهش بارندگی خواهیم بود. این کاهش بارندگی در شرق کشور حدود ۲۰ میلی‌متر و در غرب کشور حدود ۷۰ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود. بنابراین، احتمال دارد تحت سناریوی A2 مناطق کم‌باران ایران، کم‌باران‌تر شوند و خشکسالی‌ها در دوره آتی دوم افزایش یابند. با استفاده از ArcMap میزان تغییرات حجم بارش کشور محاسبه شد و ملاحظه شد که در دوره آتی اول حجم بارش سالانه کل کشور حدود ۱/۰۲ میلیارد مترمکعب و در دوره آتی دوم حدود ۱۶/۵۲ میلیارد مترمکعب کاهش خواهد یافت. با فرض متوسط بارش ۲۴۰ میلی‌متری سالانه کشور، حجم سالانه بارش در کشور حدود ۴۰۰ میلیارد مترمکعب تعیین می‌شود. بنابراین، در دوره آتی اول درصد کاهش حجم بارش سالانه کشور، حدود ۰/۲۵ و در دوره آتی دوم حدود ۴/۱۳ خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تغییرات دما و بارندگی ایران در دو دوره آتی ۲۰۱۶-۲۰۴۵ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ بررسی شد. طی این بررسی مشخص شد که در هر دو دوره آتی، افزایش دمای متوسط کشور در ماه‌های گرم سال نسبت به ماه‌های سرد سال بیشتر است. در دوره آتی اول، هر سه سناریوی انتشار، افزایش دمای

- [2]. IPCC. Climate change. The science of climate change. Contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds. Houghton JT, Filho LGM, Callander BA, Harris N, Attenberg A, Maskell K. Cambridge University Press, Cambridge. 2001.
- [3]. Lobell BD, Sibley A, Ortiz-Monasterio JI. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature Climate Change*. 2012; 2: 186-189.
- [4]. FAO. Adaptation to climate change in agriculture, forestry and fisheries: Perspective, framework and priorities. Interdepartmental Working Group on Climate Change. Rome. Available on: <http://www.fao.org>. 2007;
- [5]. Ruiz-Ramos M, Minguez MI. Evaluating uncertainty in climate change impacts on crop productivity in the Iberian Peninsula. *Climate Research*. 2010; 44: 69-82.
- [6]. IPCC-TGICA. General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. eds. Carter, T.R. 2007. Version 2, 71p. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment.
- [7]. Allan RP, Soden BJ. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*. 2008; 321: 1481-1483.
- [8]. Delghandi M, Risk Assessment of climate change impact on potential evapotranspiration (Case study: Shahrood region). *Iranian of Irrigation & Water Engineering*. 2016; 23: 156-167. [Persian].
- [9]. Tapiador FJ, Sanchez E, Gaertner MA. Regional changes in precipitation in Europe under an increased greenhouse emissions scenario. *Geophysical Research Letters*. 2007; 34: L06701.
- [10]. Parracho AC, Melo-Gonçalves P, Rocha A. Regionalization of precipitation for the Iberian Peninsula and climate change. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2015; 94: 146-154
- [11]. Rodriguez-Puebla C, Encinas, AH, Nieto S, Garmendia J. Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*. 1998; 18: 299-316.
- [12]. Trambly Y, Badi W, Driouech F, El Adlouni S, Neppel L, Servat E. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global and Planetary Change*. 2012; 82-83: 104-114.
- [13]. Wu F, Wang , Cai Y, Li Ch, Spatiotemporal analysis of precipitation trends under climate change in the upper reach of Mekong River basin. *Quaternary International*. 2016; 392 (21): 137-146.
- [14]. Willems P, Vrac M. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. *Journal of Hydrology*. 2011; 402: 193-205.
- [15]. Poulter B, Pederson N, Liu H, Zhu Z, D'Arrigo R, peCiais P, et al. Recent trends in Inner Asian forest dynamics to temperature and precipitation indicate high sensitivity to climate change *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013; 178-179: 31-45.
- [16]. Helfer F, Lemckert C, Zhang H. 2012. Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology* 2012; 475: 365-378.
- [17]. Ribalaygua J, Rosa Pinob M, Pórtoles J, Roldán E, Gaitána E, Chinarro D, et al. Climate change scenarios for temperature and precipitation in Aragón (Spain). *Science of The Total Environment*. 2013; 463-464: 1015-1030.
- [18]. Almazroui M, Saeed F, Nazrul Islam Md, Alkhalaf AK. Assessing the robustness and uncertainties of projected changes in temperature and precipitation in AR4 Global Climate Models over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*. 2016; 182 (15): 163-175.
- [19]. Gulacha MM, Mulungu DMM. 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*, 2016: In press.
- [20]. Carvalho MJ, Gonçalves PM, Teixeira JC, Rocha A. Regionalization of Europe based on a K-Means Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2016; 94: 22-28.
- [21]. Gonçalves PM, Rocha A, Santos JA. Robust inferences on climate change patterns of precipitation extremes in the Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2016; 94: 114-126.
- [22]. Piras M, Mascaro G, Deidda R, Vivon ER. Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin. *Science of The Total Environment*. 2016; 543: 952-964.
- [23]. Kouhestani S, Eslamian SS, Abedi-Koupai J, Besalatpour AA. Projection of climate change impacts on precipitation using soft-computing techniques: A case study in

- Zayandeh-rud Basin, Iran. *Global and Planetary Change*. 2016; 144:158-170.
- [24]. Hamidianpour M, Baaghideh M, Abbasnia M. Assessment of the Precipitation and Temperature Changes over South East Iran Using Downscaling Of General Circulation Models Outputs. *Physical Geography Research Quarterly*. 2016; 48 (1): 107-123. [Persian].
- [25]. Pirmoradian N, Hadinia H, Ashrafzadeh A. Prediction of Minimum and Maximum Temperature, Radiation and Precipitation in Rasht Synoptic Station under Different Climate Change Scenarios. *Journal of Geography and Planning*. 2016; 55: 29-44. [Persian].
- [26]. Rezaei M, Nohtani M, Moghaddamnia A, Abkar A, Rezaei M. Long- term Precipitation Prediction Using Statistical Downscaling Model. *Water and Soil Science*. 2016; 26 , 1(2):115-127. [Persian].
- [27]. Taei Semiromi S, Moradi HR, Khodagholi M. Simulation and prediction some of climate variable by using multi line SDSM and Global Circulation Models (Case study: Bar Watershed Nayshabour). *Journal of Human and Environment*. 2014; 12 (28): 1-15. [Persian].
- [28]. Khazaei MR, Byzedi M. Climate Change Impact on Annual Meteorological and Hydrological Variables of the Sirvan Basin. *Iran-Water Resources Research*. 2016; 12 (2): 38-48. [Persian].
- [29]. Salajegheh A, Rafiei Sardooei E, Moghaddamnia A, Malekian A, Araghinejad Sh, Khalighi Sigaroodi Sh, et al. Prediction of Climatic Variables using Statistical Downscaling Model (SDSM) in Future under Scenario A2. *Desert Management*. 2016; 7: 12-25. [Persian].
- [30]. López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Angulo-Martínez M, Beguerías S, Kenawy A. Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955-2006. *International Journal of Climatology*. 2009; 30: 1026-1041.
- [31]. Ghabaei Sough M, Mosaedi A. Modification of Reconnaissance Drought Index (RDI) based on the best method of evapotranspiration estimation and probability distribution function. *Journal of Range and Watershed Management*. 2014; 66 (4): 565-582. [Persian].
- [32]. Wilby RL, Harris I. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*. 2006; 42 (2): W02419.
- [33]. IPCC- TGCIA. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. eds. Carter TR, Hulme M, Lal M.. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment. 1999; 1: 69 pp.
- [34]. Lobell DB, Ortiz-Manasterio I. Evaluating strategies for improved water use in spring wheat with CERES. *Agricultural Water Management*. 2006; 84: 249-258.