6TH INTERNATIONAL REGIONAL CONFERENCE ON CLIMATE CHANGE TEHRAN, IRAN NOV. 18-19, 2019
ششمین کنفرانس بین‌المللی-منطقه‌ای تغییر اقلیم ایران، تهران

Ministry of Roads & Urban Development

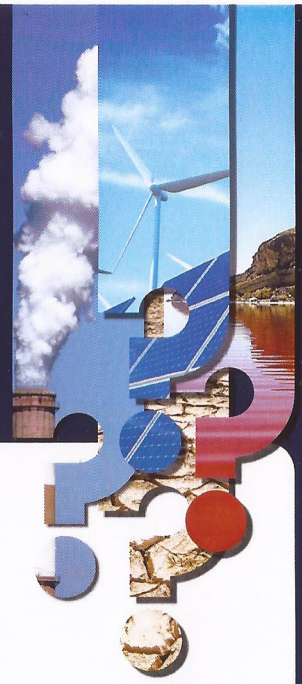
6TH INTERNATIONAL - REGIONAL CONFERENCE ON CLIMATE CHANGE

18-19 NOVEMBER 2019 / NATIONAL LIBRARY OF IRAN, TEHRAN, IRAN

I.R. OF IRAN METEOROLOGICAL ORGANIZATION

ISC

Indexed on the Islamic World Science Citation Center (ISC)
with code: 98190-53287



Date: 2019/11/19
No: 5133

Certificate of Participation

This is to certify that

Azar Zarrin and Narges Salehabadi

have presented the Poster:

Drought Projection in Tehran based on CMIP6 models

at 6th International-Regional Conference on Climate Change
18-19 November 2019, National Library of Iran, Tehran, Iran.

Sahar Tajbakhsh
President of IRIMO and Conference

Sahar Tajbakhsh

6th INTERNATIONAL REGIONAL CONFERENCE ON CLIMATE CHANGE TEHRAN, IRAN NOV. 18-19, 2019

Mehdi Rahnama
Chair of Scientific Committee

Main Partners:

World Meteorological Organization (WMO) | Ministry of Foreign Affairs | Ministry of Energy | Ministry of Agriculture Jihad | Department of Environment | Atmospheric Science & Meteorological Research Center | Iranian Meteorological Society

RCCC.irimo.ir

ششمین کنفرانس بین المللی منطقه ای تغییر اقلیم
6TH INTERNATIONAL – REGIONAL CONFERENCE ON CLIMATE CHANGE
18-19 NOVEMBER 2019 / NATIONAL LIBRARY OF IRAN, TEHRAN, IRAN
ثبت شده در پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) با کد: ۹۸۱۹۰-۵۳۲۸۷

وزارت راه و شهرسازی

سازمان هواشناسی کشور

RCCC-03560367

پیش آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6

آذر زرّین[۱*]، نرگس صالح‌آبادی[۲]
۱- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۲- کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی سینوپتیک ، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
* zarrin@um.ac.ir

چکیده:

هدف از انجام این مطالعه پیش آگاهی شدت و مدت خشکسالی در تهران با استفاده از داده‌های تازه منتشر شده CMIP6 می‌باشد. در این بررسی از برون داد سه مدل BCC-CSM2-MR, GFDL-CM4 و MRI-ESM2-0 که تا زمان نگارش این مقاله (تابستان ۱۳۹۸) داده‌هایشان بر روی سایت در دسترس قرار داده شده است استفاده شد. به‌منظور بررسی شدت و مدت خشکسالی های آینده در تهران, دادهٔ بارش ماهانه تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه برای سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ و برای یک دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۵) استخراج شد. از داده‌های بارش ماهانه ایستگاه مهراباد تهران جهت ریزمقیاس نمایی مدل ها استفاده گردید و مشخص گردید که مدل BCC در مقایسه با دو مدل GFDL و MRI دارای دقت مناسبتری برای مطالعه بارش و خشکسالی در این منطقه است. نتایج به دست آمده نشان داد که به‌طور کلی مقادیر بارش ماهانه تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه در دهه‌های آینده نوسانات بالایی را تجربه خواهد نمود. پیش آگاهی مخاطره خشکسالی با استفاده از چهار شاخص SPI، ZSI، MCZI و RAI نشان داد که خشکسالی تحت سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی خوش بینانه در سال‌های آینده شدت بیشتری خواهد یافت. همچنین تعداد رخدادهای خشکسالی تحت سناریوی خوش بینانه در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت درحالی‌که طبق سناریوی بدبینانه فراوانی رخدادها دارای نوسان خواهد بود.

کلمات کلیدی: BCC-CSM2-MR، CMIP6، شاخص‌های خشکسالی، تهران، SPI، MCZI، RAI، ZSI.

پیش آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران بر اساس برونداد مدل هایCMIP6

آذر زرّین[1]*، نرگس صالح‌آبادی[2]

۱- استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- کارشناس ارشد اقلیم شناسی سینوپتیک ، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* zarrin@um.ac.ir

چکیده:

هدف از انجام این مطالعه پیش آگاهی شدت و مدت خشکسالی در تهران با استفاده از داده های تازه منتشر شده CMIP6 می باشد. در این بررسی از برون داد سه مدل BCC-CSM2-MR, GFDL-CM4 و MRI-ESM2-0 که تا زمان نگارش این مقاله (تابستان ۱۳۹۸) داده هایشان بر روی سایت در دسترس قرار داده شده است استفاده شد. به منظور بررسی شدت و مدت خشکسالی های آینده در تهران، داده ی بارش ماهانه تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه برای سالهای ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ و برای یک دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۵) استخراج شد. از داده های بارش ماهانه ایستگاه مهراباد تهران جهت ریزمقیاس نمایی مدل ها استفاده گردید و مشخص گردید که مدل BCC در مقایسه با دو مدل GFDL و MRI دارای دقت مناسبتری برای مطالعه بارش و خشکسالی در این منطقه است. نتایج به دست آمده نشان داد که به طور کلی مقادیر بارش ماهانه تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه در دهه‌های آینده نوسانات بالایی را تجربه خواهد نمود. پیش آگاهی مخاطره خشکسالی با استفاده از چهار شاخصSPI MCZI ، ZSI و RAI نشان داد که خشکسالی تحت سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی خوش بینانه در سال‌های آینده شدت بیشتری خواهد یافت. همچنین تعداد رخدادهای خشکسالی تحت سناریوی خوش بینانه در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت در حالی که طبق سناریوی بدبینانه فراوانی رخدادها دارای نوسان خواهد بود.

کلمات کلیدی: CMIP6، BCC-CSM2-MR ، شاخص‌های خشکسالی، تهران، SPI، MCZI، ZSI، RAI

Drought Projection in Tehran based on CMIP6 models

Azar Zarrin[1*], Narges Salehabadi[2]

*1- Assistant Professor, Geography Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

2- Master of Climatology, Geography Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad

Abstract:

The purpose of this study was to project the severity and duration of drought in Tehran using newly published CMIP6 data. The study used three models of BCC-CSM2-MR, GFDL-CM4, and MRI-ESM2-0 output that were available on site at the time of writing this paper (August 2019). In order

to investigate the severity and duration of future droughts in Tehran, monthly rainfall data were extracted under two optimistic and pessimistic scenarios, respectively SSP245 and SSP585 for years 2015 to 2100 and for a historical period (1991-2015). Monthly precipitation data from Tehran Mehrabad station were used to downscale the models and it was found that BCC model is more accurate for studying precipitation and drought in this area than GFDL and MRI models. The results show that in general, monthly precipitation values under the two scenarios of SSP245 and SSP585 will experience high fluctuations in the coming decades. Projection of drought risk using the four indices SPI, MCZI, ZSI and RAI showed that drought under the SSP585 scenario will be more severe and fluctuating in the coming years than the SSP245 scenario. The number of drought events under the SSP245 scenario will also increase in the coming years, while the drought events under the SSP585 scenario will experience more fluctuations.

Keywords: CMIP6, SSP,BCC-CSM2-MR, SPI, MCZI, ZSI, RAI, drought indices, Tehran

۱. مقدمه

خشکسالی که با بارندگی کمتر از حد طبیعی در یک ماه از سال تا سال‌ها مشخص می‌گردد، در سال‌های اخیر به یک نگرانی فزاینده تبدیل گردیده است. پیامدهای اقتصادی و زیست محیطی خشکسالی به دلیل دوام و وسعت فضایی آن باعث شده تا خشکسالی در شمار جدی‌ترین بلایای طبیعی قرار گیرد[۱]. پیش‌بینی می‌شود که دفعات و شدت خشکسالی‌ها در دهه‌های آینده به دلیل تغییر اوضاع(مانند افزایش دما) تغییر نماید، بنابراین پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی یک مبنای مهم برای درک تغییرات آینده می‌باشند و درنهایت به تصمیم‌گیری و سیاستگذاری‌های آینده کمک شایانی خواهند نمود[۲]. با توجه به اینکه تاثیرات خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک جهان شدیدتر است و این مناطق را با معضلات جدی‌تری نسبت به سایر مناطق جهان رو به‌رو می‌سازد و با توجه با اینکه ایران و پایتخت آن، تهران نیز در کمربند خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته است، بنابراین برای کمک به کاهش تلفات مرتبط و مدیریت اثرات ناشی از این پدیده، باید حوادث خشکسالی در دهه‌های آینده در شهر تهران به دقت کنترل شود. علاوه بر این، درک چگونگی تغییرات خشکسالی تحت سناریوهای تغییر اقلیم، مهم و ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات فراوان در زمینه تغییر اقلیم و رفتار پارمترها و پدیده‌های مختلف در دهه‌های آینده در سطح جهان مورد بررسی قرار گرفته است که از آن جمله جریان آب در غرب کنیا تحت شرایط تغییر اقلیم و در سال‌های آینده با استفاده از داده‌های پروژه cmip5 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که مقادیر بارندگی سالانه در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت به طوری که میزان بارندگی در دهه ۲۰۵۰ نسبت به دهه ۲۰۲۰ بیشتر خواهد بود. همچنین تجزیه و تحلیل‌ها مشخص نمود که جریانات آب به تغییرات دما حساس نمی‌باشد[۳]. همچنین در مطالعه ای، دما و رطوبت در ترازهای پایین جو بر روی آمریکا و برای دوره های آینده مورد بررسی قرار گرفتند و آنچه که ارائه شد شامل افزایش ۲/۵ درجه ای دما در آمریکای شمالی و ۲/۸ درجه‌ای در آمریکای جنوبی تا سال ۲۰۵۰ است و بر میزان رطوبت جو تا سال ۲۰۹۵ حدود ۳ g kg-1 افزوده می‌شود[۴]. با بررسی وضعیت بارش و دما در طی سال‌های آینده بر روی چین با استفاده از داده های ۳۵ مدل از پروژه CMIP5 مشخص گردید که دما در دو سناریو RCP45 و RCP85 بر روی چین افزایش خواهد یافت و در بین فصول سال، فصل زمستان در طی سال‌های آتی گرمایش شدیدتری را تجربه خواهد نمود. همچنین بیشتر مناطق چین در نتیجه افزایش تبخیر ناشی از افزایش دما خشک‌تر خواهد شد[۵]. در مطالعه ای میزان بارش برف در نیمکره شمالی برای دوره ۲۰۰۶-۲۱۰۰ با استفاده از خروجی مدل های پروژه CMIP5 و تحت سناریو RCP45 مورد بررسی

قرار گرفت و پیش بینی می‌گردد که بارش برف در طول قرن ۲۱ در بیشتر مناطق نیمکره شمالی کاهش و در عرض‌های بالاتر نیز میزان بارش برف افزایش خواهد یافت[۶]. با استفاده از مدل های پروژه CMIP5 همچنین اقلیم بولیوی مورد مطالعه قرار گرفته است و تمامی مدل ها با افزایش دمای بولیوی (حدود ۲/۵ و ۵/۹ درجه سانتی‌گراد) تا سال ۲۰۹۹ و کاهش بارش آن در طول ماه های خشک (ژوئن تا نوامبر) (حدود ۱۹ درصد کاهش) اتفاق نظر داشته اند[۷]. طبق مطالعه‌ای که بر روی حدی‌های اقلیم در منطقه ایالات متحده آمریکا با استفاده از داده های پروژه CMIP5 انجام گرفت مشخص گردید که دماهای حدی بالا در طی سال‌های آینده بر روی منطقه مورد مطالعه افزایش و دماهای حدی پایین کاهش خواهد یافت. همچنین مدل‌ها روند افزایشی را در رخداد بارش‌های سنگین در این منطقه ارائه می‌دهند[۸]. با مطالعه‌ی[۹] بر روی جریان آب در حوضه آبریز هیوانگنی ژانگ تحت شرایط تغییر اقلیم، مشخص گردید که جریان آب در این حوضه به احتمال زیاد کاهش یابد و دلیل آن افزایش تبخیر و تعرق ناشی از افزایش دما در طی سال‌های آینده می‌باشد. پیش‌بینی بارش موسمی تابستانه هند نیز برای دهه‌های آینده با استفاده از مدل های RCM و برای دو سناریو RCP45 و B1 مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج نشان دهنده افزایش اندکی در بارش هندوستان در پایان قرن۲۱ در سناریوی RCP45 و روند کاهشی در میزان بارش در سناریو B1 می‌باشد[۱۰]. همچنین مطالعه تغییرات فصلی بارش و دما، مشخص نمود که در اواخر قرن ۲۱ ، دما از اواسط زمستان و اواخر تابستان و بارش نیز در اواخر زمستان و اوایل بهار افزایش چشمگیری پیدا می‌کند[۱۱]. همچنین با استفاده از ۲۲ مدل پروژه‌ی cmip5 اقلیم غرب آفریقا (محدوده ای که دما نسبت به دیگر مناطق آن پایین‌تر است) مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان داد که خروجی مدل های CMIP5 نسبت به داده های واقعی تمایل اندکی به توسعه دمای پایین در غرب آفریقا دارند. همچنین مشخص گردید در مدل هایی که محدوده‌ی دمای پایین در شمال آفریقا قرار دارد میزان بارش بیشتری را در سواحل آن نشان می‌دهند و در مدل هایی که محدوده‌ی دمای پایین به شرق نزدیک‌تر است با تقویت فعالیت امواج شرقی قوی همراه است[۱۲]. در پژوهشی فصل های مرطوب که دارای بالاترین میزان بارش بر روی افریقا هستند تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی آینده مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص گردید که تا پایان قرن ۲۱ در سناریو RCP85 و در طول فصل باران های کوتاه مدت در آفریقا میزان بارش به طور متوسط حدود ۱۰۰ میلی متر افزایش می‌یابد[۱۳]. در ایران نیز در ارتباط با تغییرات اقلیمی مطالعاتی انجام گرفته است به عنوان مثال نتایج مطالعه پارامترهای دمایی برای دو اقلیم خشک و فراخشک(کرمان و بم) برای دوره ۲۰۷۰-۲۰۱۰ آشکار نمود که افزایش دما در تمام ماه های سال برای هردو ایستگاه در دوره های آینده رخ خواهد داد[۱۴]. همچنین با مقایسه تغییرات پارامترهای اقلیمی در جبهه شمالی و جنوبی البرز مشخص شد که در همه ایستگاه‌های منطقه، میانگین، حداقل و حداکثر دما و بارش در دوره ۲۰۴۹-۲۰۲۰ نسبت به دوره مشاهداتی دارای یک روند افزایشی است اما شدت افزایش در جبهه های جنوبی بیشتر از شمالی خواهد بود[۱۵]. پژوهشی بر مبنای اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و طول دوره رشد گیاه نیشکر تحت سناریو های واداشت تابشی در ایستگاه‌های جنوب غرب ایران انجام گرفته است[۱۶] و نتایج حاصل از آن نشان دهنده افزایش بارش (در حدود ۳۵٪) در فصل رشد گیاه در تمام ایستگاه های مورد مطالعه به جز در ایستگاه دزفول نسبت به میانگین اقلیمی است و طول دوره رشد در سناریو RCP85 در تمام ایستگاه ها کاهش معناداری را نشان می‌دهد. در مطالعه ای نیز تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت مشهد تحت سناریوهای واداشت تابشی مورد ارزیابی قرار گرفت[۱۷] و از نتایجی که ارائه نموده‌اند این است که بیشترین افزایش مقدار تبخیر تعرق پتانسیل در ماه ژانویه تحت دو سناریو RCP45 و RCP85 به ترتیب با ۱۵/۴٪ و ۱۶/۴٪ افزایش نسبت به دوره پایه و نیز بیشترین مقدار کاهش در حدود ۱۲/۵٪ و ۱۰٪ کاهش در ماه اکتبر نسبت به دوره پایه مشاهده شد. با مطالعه تاثیر تغییر اقلیم بر درجه حرارت حوضه آبریز زاینده رود برای دوره آتی (۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰) مشخص گردید که بیشترین افزایش دما برای هردو پارامتر حداقل و حداکثر دما در فصل زمستان اتفاق خواهد افتاد و تغییرات سالانه دمای حداکثر نشان دهنده افزایش دمای بین ۰/۲۵ تا ۱/۶۷ درجه سانتی گراد در دوره آینده دور (۲۰۵۰-۲۱۰۰) می‌باشد.

تغییرات سالانه دمای حداقل نیز نشان دهنده افزایش دمای بین ۰/۲۴ تا ۱/۵۶ درجه سانتی گراد در دوره آینده دور می‌باشد[۱۸]. در حوضه کارون شمالی نیز دمای کمینه در ماه های سرد سال در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ دارای روند افزایشی و تعداد روزهای با دمای صفر وکمتر، سطح پوشش برف و میزان آبدهی حوضه دارای روند کاهشی است[۱۹]. همچنین ارزیابی مدل های cmip5 تحت دو سناریو ۴,۵ و ۸,۵ برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۰۵ در ایران نشان دادکه روند تغییرات بارش آتی در جنوب شرق، شمال شرق، گوشه شمال غرب و شرق خزر منفی و در نواحی مرکزی و برخی استان های غربی مثبت خواهد بود[۲۰]. در حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب نیز بیشترین دمای ماهانه درایستگاه کرمانشاه به ترتیب حداکثر تا ۲/۷۵ و ۲/۱۵ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه همدان به ترتیب حداکثر تا ۳/۴۳ و ۴/۲۶ درجه سانتی‌گراد با توجه به سناریوهای مختلف افزایش خواهد یافت[۲۱]. هرچند مطالعات فروانی در زمینه تغییراقلیم و وضعیت پارامترهای مختلف اقلیمی در سال‌های آینده در سطح کشور به انجام رسیده، اما با توجه به آسیب‌پذیری کشور ایران که یک کشور در حال توسعه می‌باشد و در منطقه خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته، مطالعه خشکسالی و درک شدت و مدت آن در طی سال‌های آینده می‌تواند به تصمیم‌گیری و سیاستگذاری بهتر به منظور کاهش خسارات ناشی از این پدیده کمک شایانی نماید. با توجه به انتشار داده های فاز ششم مدل های جفت شده (CMIP6) در سال ۲۰۱۹، هدف از این پژوهش ارزیابی اولیه خروجی سه مدل در دسترس و ارائه پیش آگاهی وضعیت خشکسالی در تهران با استفاده از این داده ها تحت دو سناریوی تغییر اقلیم خوش بینانه و بدبینانه می باشد.

۲. داده و روش

الف. داده‌ها

در این مطالعه از دو دسته داده ایستگاهی و مدل سازی شده استفاده گردید. داده ایستگاهی شامل متغیر بارش ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران می‌باشد که به منظور راستی آزمایی داده های تاریخی مدل، از داده های مربوط به دوره مشترک ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۴ استفاده گردید. از داده های ایستگاهی به عنوان داده‌های مشاهداتی و از داده‌های تاریخی برآورد شده توسط مدل ها به عنوان داده هیستوریکال نیز یاد می‌گردد. دسته دوم داده های برون داد سه مدل اقلیمی BCC-CSM2-MR, GFDL-CM4و MRI-ESM2-0 می باشد که تا زمان نگارش این مقاله (تابستان ۱۳۹۸) داده هایشان بر روی سایت در دسترس قرار داده شده است (جدول ۱). داده‌های برآورد شده اقلیم آینده بر اساس سناریوهای SSP است. در فاز ششم (CMIP6) از تلفیق سناریوهای اجتماعی – اقتصادی مشترک در کنار سناریوهای نماینده غلظت گازهای گلخانه ای برای تحلیل پس خورهای بین تغییرات اقلیمی و فاکتورهای اجتماعی – اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت های فناوری استفاده شده است. کمیت های اصلی شامل سن، جنسیت، تحصیلات، شهرنشینی و توسعه اقتصادی (درامد سرانه) می باشد. پنج سناریوی اصلی و تعدادی سناریوی فرعی به عنوان سناریوهای جدید در این مدل ها جهت

شبیه سازی اقلیم آینده طراحی و به کار برده شده است. سناریوهای مورد استفاده در این پژوهش شامل دو سناریوی SSP245 و SSP585 در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۱۴ می‌باشد.

جدول ۱. مدل های CMIP6 که در این پژوهش استفاده شده اند.

	علامت اختصاری مدل	نام کامل مدل	تفکیک افقی	نام مرکز توسعه دهنده
۱	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center climate system model version 2	100 km	Beijing climate Center
۲	GFDL-CM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model, version 4	100 km	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
۳	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute Earth System Model version 2	100 km	Meteorological Research Institute

ب. روش‌ها

به منظور دست یافتن به اهداف این مطالعه در ابتدا صحت هریک از سه مدل مورد مطالعه در برآورد بارش تهران مورد مطالعه قرار گرفت. از آن جاییکه تفکیک افقی داده های هر سه مدل ۱۰۰ کیلومتر می باشد، در ابتدا یاخته مربوط به داده ها بر روی منطقه تهران بررسی شد و ایستگاه مهرآباد تهران به عنوان نماینده این منطقه انتخاب گردید. داده‌های مربوط به نزدیکترین نقطه شبکه به ایستگاه مهرآباد تهران از هر یک از مدل‌ها استخراج گردید. سپس میزان خطای RMSE داده‌ی استخراج شده از برون داد مدل ها نسبت به داده های ایستگاهی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - P_i)^2 / N-1}$$ رابطه ۱-

به منظور کالیبره نمودن داده های بارش سه مدل مورد استفاده، نتایج دوره راستی آزمایی در یک ضریب اصلاحی که طبق رابطه ۲ محاسبه می‌گردند، ضرب شدند. در این رابطه $\overline{Pr}_m^{st}$ شامل میانگین داده های بارش ماهانه ایستگاهی و $\overline{Pr}_m^{cordex}$ شامل میانگین داده‌های بارش ماهانه مدل می‌باشد[۲۲].

$$Coeff_m = \overline{Pr}_m^{st} / \overline{Pr}_m^{cordex}$$ رابطه ۲-

سپس مقدار همبستگی پیرسون هریک از سه مدل با داده‌های ایستگاهی بررسی گردید و از بین سه مدل ، مدلی که کمترین خطا و بیشترین همبستگی را با داده های ایستگاهی نشان می‌دهد به عنوان مدل مورد مطالعه جهت بررسی وضعیت بارش و خشکسالی در سال‌های آینده انتخاب گردید. بعد از انتخاب مدل مناسب، با استفاده از چهار شاخص خشکسالی SPI، Z-

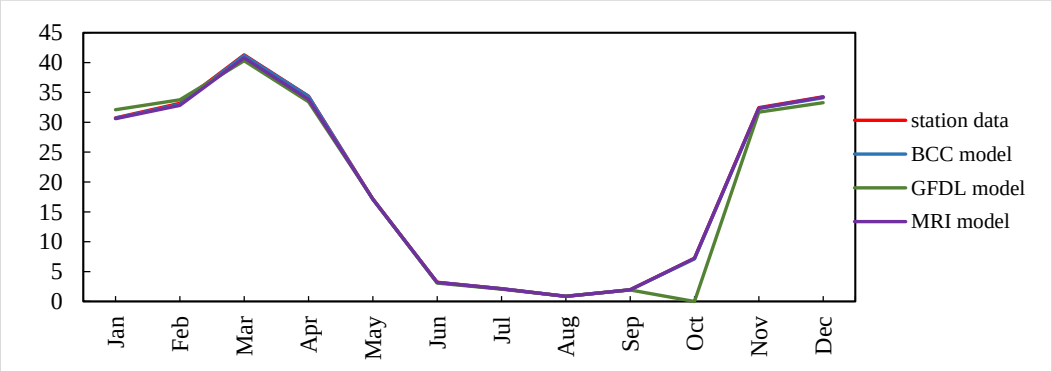
SCORE، MCZI و RAI وضعیت خشکسالی در طی سال‌های آینده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش های پیشین نشان داده است که روند تغییرات سه شاخص PN،SPI و DI و دو شاخص CZI وMCZI، دارای تطابق یکسانی در بیان خشکسالی‌های به وقوع پیوسته داشتند[۲۲]. بنابراین در این مطالعه از بین هشت شاخص خشکسالی هواشناسی، چهار شاخص SPI، MCZI، Z-score و RAI برای بررسی خشکسالی انتخاب گردید.

۳. یافته‌ها

در ابتدا به منظور مشخص نمودن مناسب ترین مدل جهت بررسی بارش در تهران، مقدار خطای RMSE آنها نسبت به داده‌های ایستگاهی مورد محاسبه قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده مشخص گردید که مدل MRI قبل از تصحیح داده‌ها بالاترین خطا را نسبت به داده های ایستگاهی دارد درحالی که بعد از تصحیح مدل GFDL بالاترین خطا با مقدار ۲/۱۹ را نشان می‌دهد، این درحالیست که میزان خطای داده‌ها در مدل BCC بعد از تصحیح به پایین‌ترین مقدار که حدود۰/۰۹ است، رسیده است(جدول۲) و (شکل۱).

جدول-۲: مقادیر خطای RMSE مربوط به مدل‌های مورد مطالعه

مدل / RMSE	BCC	GFDL	MRI
قبل از تصحیح	۶/۳۹	۱۲/۲۷	۱۴/۱۸
بعد از تصحیح	۰/۰۹	۲/۱۹	۰/۲۴



شکل-۱: راستی آزمایی داده‌های مدل در نمایش داده‌های بارش در مقایسه با داده‌های ایستگاه مهرآباد تهران

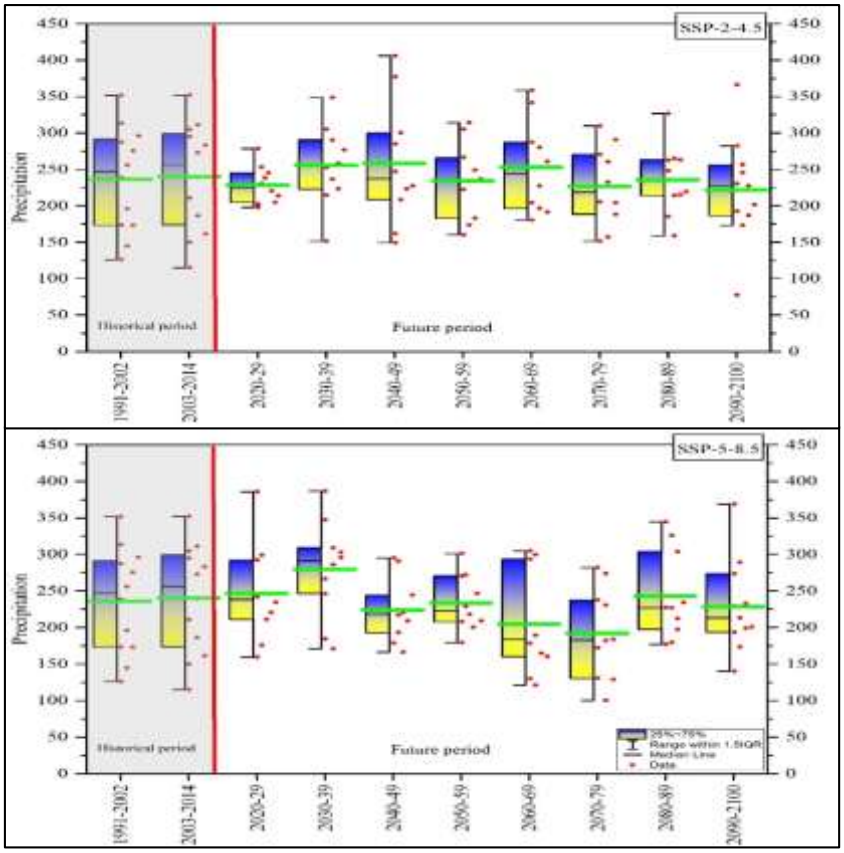
همچنین با محاسبه میزان همبستگی سه مدل با داده‌های ایستگاهی در طی دوره تاریخی(۱۹۹۱-۲۰۱۴) نیز مشخص گردید که دو مدل BCC و MRI با داده‌های ایستگاهی دارای همبستگی حدود ۰/۴۵ در سطح معناداری ۰/۹۹ می‌باشند و این حکایت از توانمندی این دو مدل در برآورد بارش ایستگاه مهرآباد تهران دارد(جدول۳). بنابراین جهت ادامه کار و بررسی

وضعیت بارش و خشکسالی در این ایستگاه از داده‌های مدل BCC به دلیل داشتن کمترین خطا نسبت به داده‌های ایستگاه و بیشترین ارتباط با داده‌های ایستگاه انتخاب گردید.

جدول-۳: مقادیر همبستگی پیرسون مدل‌های مورد استفاده با داده های ایستگاه مهرآباد تهران در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۱. علامت ** نشان دهنده سطح معناداری ۰/۹۹ می‌باشد.

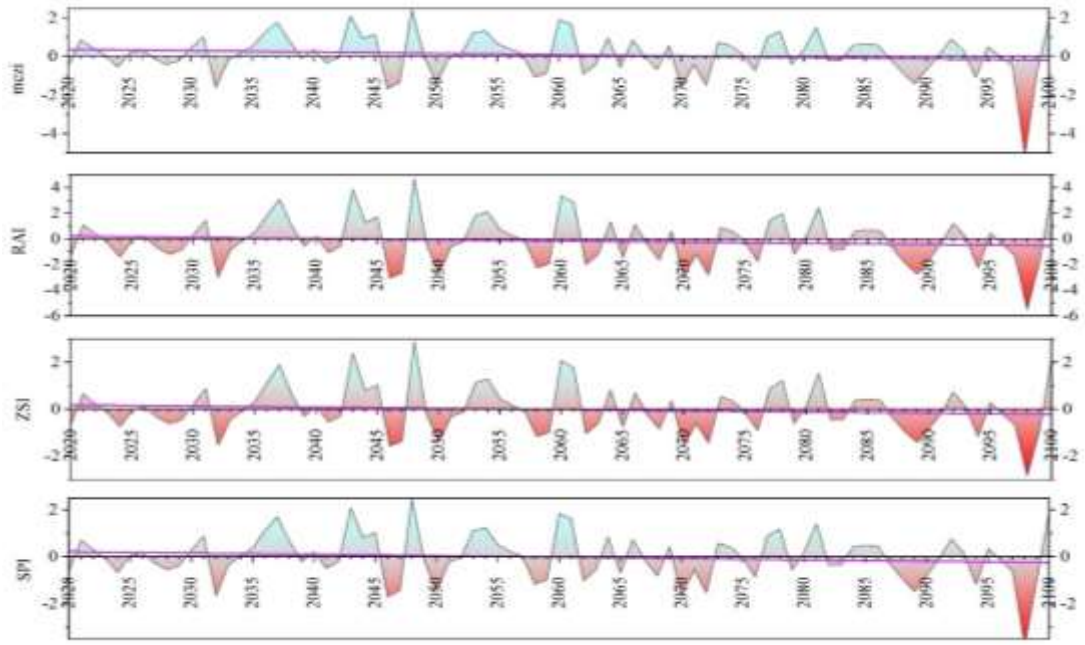
مدل / Correlation	BCC	GFDL	MRI
مقدار همبستگی	۰/۴۵**	۰/۳۱**	۰/۴۵**

نتایج تجزیه و تحلیل بارش سالانه ایستگاه مهرآباد برای دوره آینده به صورت دهه‌ای و تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه مشخص نمود که گرچه میانگین بارش در دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۱ در حدود ۲۳۸/۹ میلی‌متر بوده اما در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ تحت سناریوی خوش بینانه به حدود ۲۳۹/۱۱ میلی‌متر و تحت سناریوی بدبینانه به حدود ۲۳۱ میلی متر می‌رسد. به بیان دقیق‌تر دو سناریو بویژه سناریوی بدبینانه نوسانات زیادی را در طی دهه‌های آینده نشان می‌دهند. بطوریکه براساس سناریوی خوش بینانه بالاترین میانگین بارش در دو دهه ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ و براساس سناریوی بدبینانه نیز بالاترین میانگین بارش در دهه ۲۰۳۰ دیده می‌شود. دو سناریو نیز در اینکه در دهه ۲۰۷۰ پایین‌ترین میانگین بارش به ثبت خواهد رسید اتفاق نظر دارند. همچنین سناریوی خوش بینانه بیشترین نوسانات بارش را در دهه‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ نشان می دهد، گرچه مطابق سناریوی بدبینانه علاوه بر در دهه ۲۰۳۰، دهه‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۹۰ نیز به عنوان دهه های دارای نوسانات بارشی زیاد پیش نگری می نماید. به طور کلی در سناریوی بدبینانه میزان بارش در طول چهار دهه ۲۰۴۰ تا ۲۰۷۰ بارش، رفتار کاهشی را نشان می‌دهد و سپس از دهه هشتاد به بعد بر مقادیر بارش افزوده می‌شود(شکل ۲).

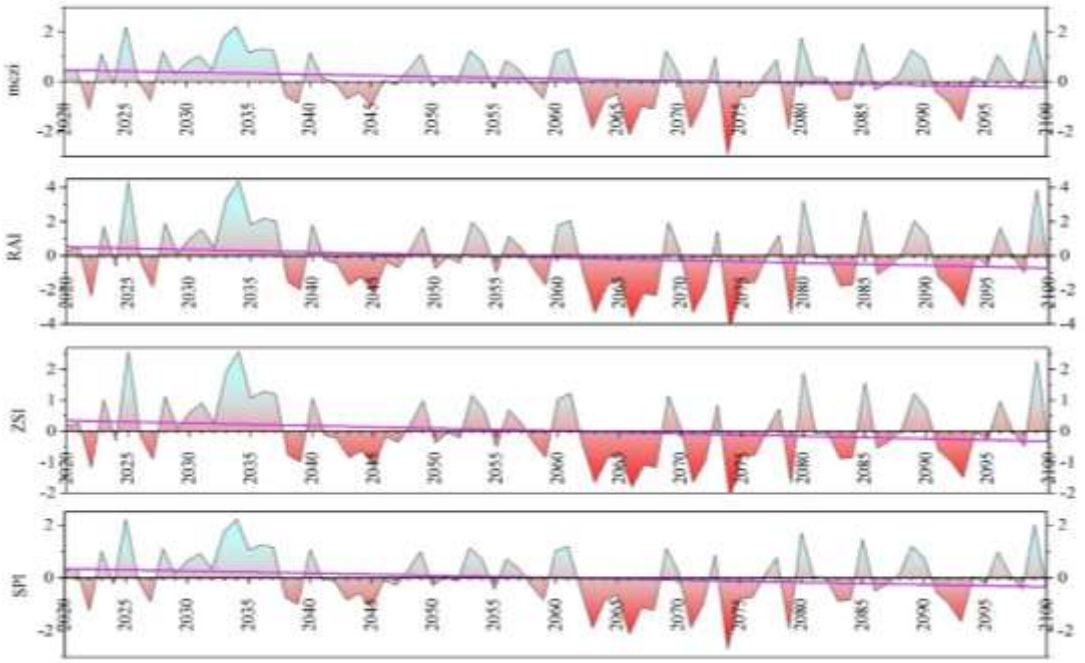


شکل-۲: مقادیر بارش برای دوره مشاهداتی(۱۹۹۱-۲۰۱۴) و دوره پیش نگری (۲۰۲۰-۲۱۰۰)

در این مرحله وضعیت خشکسالی در طی سال‌های آینده با استفاده از داده‌های مدل BCC تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه و با استفاده از چهار شاخص SPI، MCZI، RAI و ZSI مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که خروجی‌ها نشان می‌دهند، در دو سناریو رفتار چهار شاخص مورد بررسی در طی سال‌های آینده مشابه می‌باشد(شکل۳ و ۴). پیش آگاهی خشکسالی براساس سناریوی خوش بینانه حاکی از خشکسالی های شدیدی در طی تمامی دهه های آینده می باشد که در دهه ۲۰۹۰ خشکسالی از نوع بسیار شدید می‌باشد. همانگونه که روند خشکسالی در چهار شاخص نشان می‌دهد، مقادیر شدت خشکسالی در طی سال‌های آینده دارای روند معناداری نخواهند بود (شکل۳). اما مطابق سناریوی بدبینانه شدت و مدت خشکسالی ها در دهه‌های میانی افزایش یافته است به عنوان مثال در دو دهه ۲۰۴۰ و ۲۰۶۰ خشکسالی به مدت هفت سال تداوم یافته است. گرچه در سناریوی خوش بینانه خشکسالی هایی در دهه های ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ به وقوع پیوسته اما مطابق سناریوی بدبینانه شدت این خشکسالی‌ها افزایش یافته است. برخلاف سناریوی خوش بینانه، در شرایط بدبینانه شدیدترین خشکسالی در دهه ۲۰۷۰ دیده می‌شود(شکل۴). در سناریوی بدبینانه نیز همانند سناریوی خوش بینانه روند شدت خشکسالی در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ دارای روند معناداری نمی‌باشد.

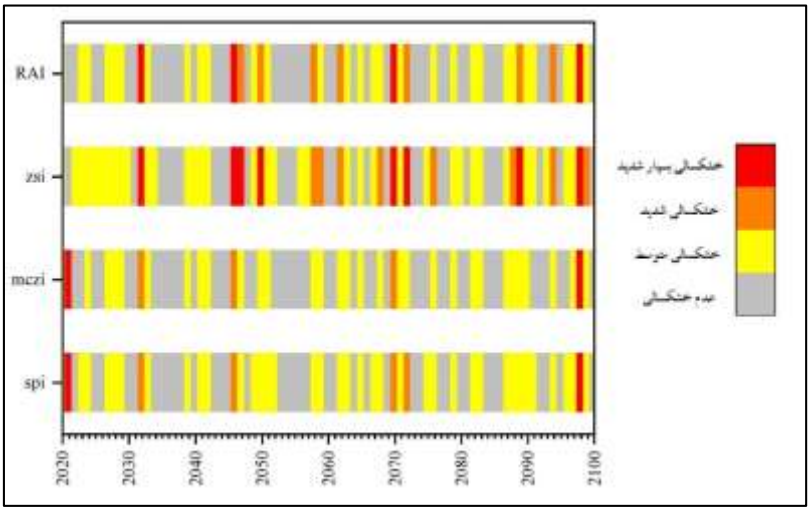


شکل-۳: وضعیت شدت و مدت خشکسالی در تهران در طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ براساس سناریوی خوش بینانه. خط بنفش رنگ نشان دهند خط روند می‌باشد.



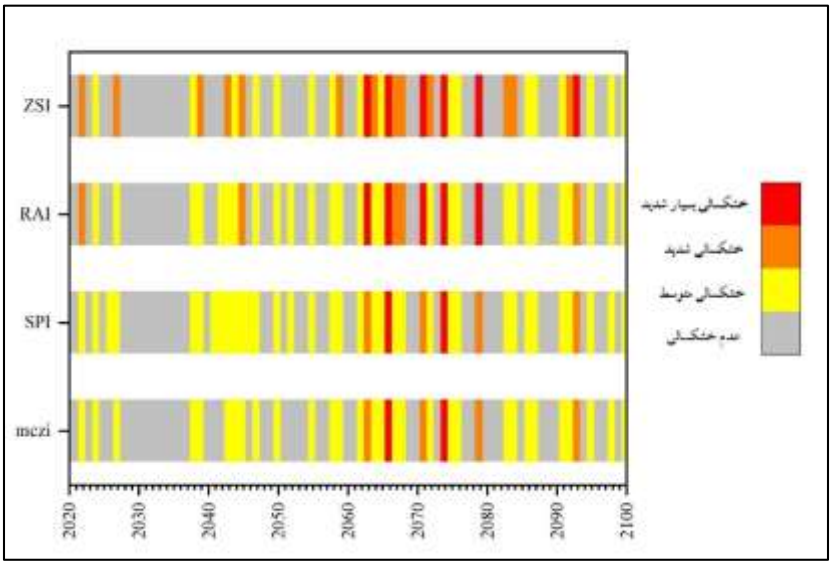
شکل-۴ وضعیت شدت و مدت خشکسالی در تهران در طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ براساس سناریوی بدبینانه. خط بنفش رنگ نشان دهند خط روند می‌باشد.

با مقایسه بصری شاخص‌های خشکسالی مورد مطالعه در طی سال‌های ۲۱۰۰-۲۰۲۰ مشخص گردید که بین دو شاخص RAI و ZSI با دو شاخص SPI و MCZI در سناریوی خوش بینانه عدم قطعیت بالایی وجود دارد به طوریکه براساس دو شاخص SPI و MCZI در اوایل دهه ۲۰۲۰ و اواخر دهه ۲۰۹۰ خشکسالی‌های بسیار شدیدی روی خواهد داد در حالی که براساس دو شاخص RAI و ZSI اواسط دهه ۲۰۴۰ و اوایل دهه ۲۰۷۰ خشکسالی‌های بسیار شدید به وقوع خواهد پیوست(شکل ۵).



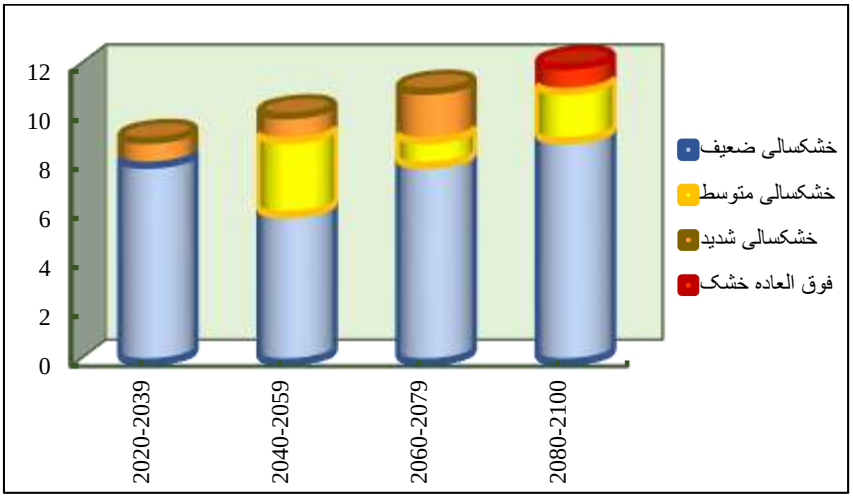
شکل-۵: رخداد خشکسالی در تهران براساس سناریوی خوش بینانه

پیش آگاهی خشکسالی تهران مطابق سناریوی بدبینانه دال بر اتفاق نظر بین چهار شاخص در شدت وقوع خشکسالی در طی دهه‌های آینده می باشد. به بیان دقیق‌تر براساس چهار شاخص مورد مطالعه، خشکسالی‌های بسیار شدیدی در اواسط دهه ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ رخ خواهد داد(شکل۶).



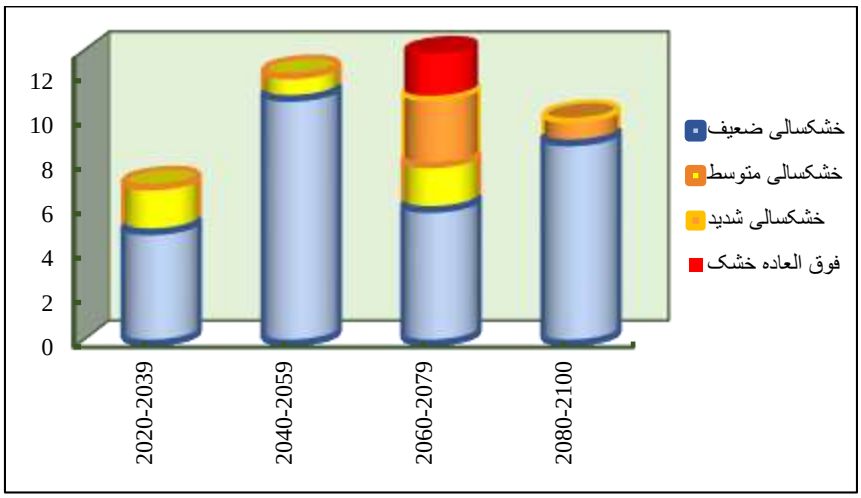
شکل-۶: رخداد خشکسالی در تهران براساس سناریوی بدبینانه

در این مرحله تعداد وقوع خشکسالی‌ها در دوره‌های بیست ساله تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که به طور کل تعداد وقوع خشکسالی‌ها براساس سناریوی خوش بینانه روندی رو به افزایش دارد. بر این اساس بیشترین تعداد وقوع خشکسالی‌های ضعیف در دوره بیست ساله اخر قرن (۲۰۸۰-۲۱۰۰) افزایش خواهد یافت. بیشترین تعداد خشکسالی متوسط در دوره ۲۰۴۰-۲۰۵۹ رخ خواهد داد و فقط یک سال با خشکسالی بسیار شدید در دوره ۲۰۸۰-۲۱۰۰ دیده می‌شود(شکل ۷).



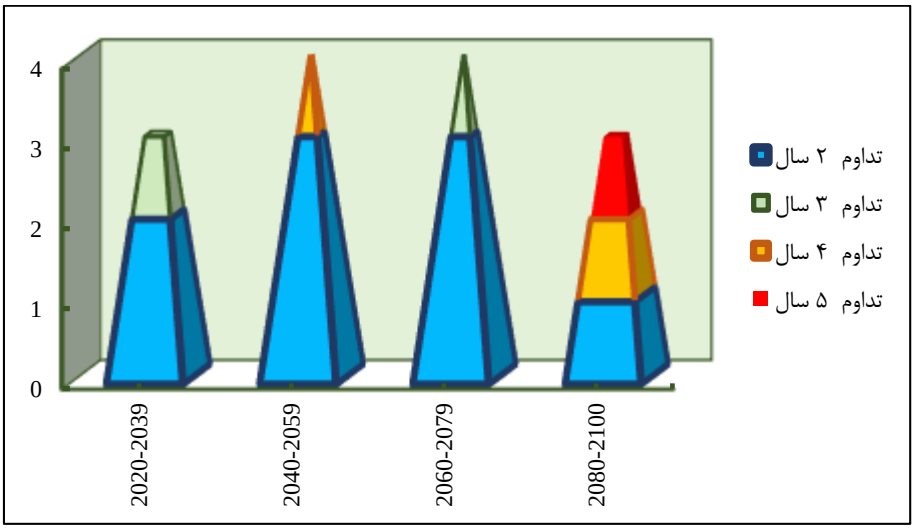
شکل-۷: فراوانی وقوع انواع خشکسالی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ در تهران براساس سناریوی خوش بینانه

بر خلاف سناریوی خوش بینانه که روندی افزایشی در فراوانی وقوع خشکسالی نشان می دهد، مطابق سناریوی بدبینانه دارای روند افزایشی نمی‌باشد. با این وجود فراوانی وقوع خشکسالی در دو دوره میانی نسبت به دوره اول و اخر بیشتر است. بیشترین فراوانی وقوع در طی دوره‌های مختلف مربوط به خشکسالی‌های ضعیف است و تنها در دوره سوم دو خشکسالی بسیار شدید دیده می‌شود(شکل۸).



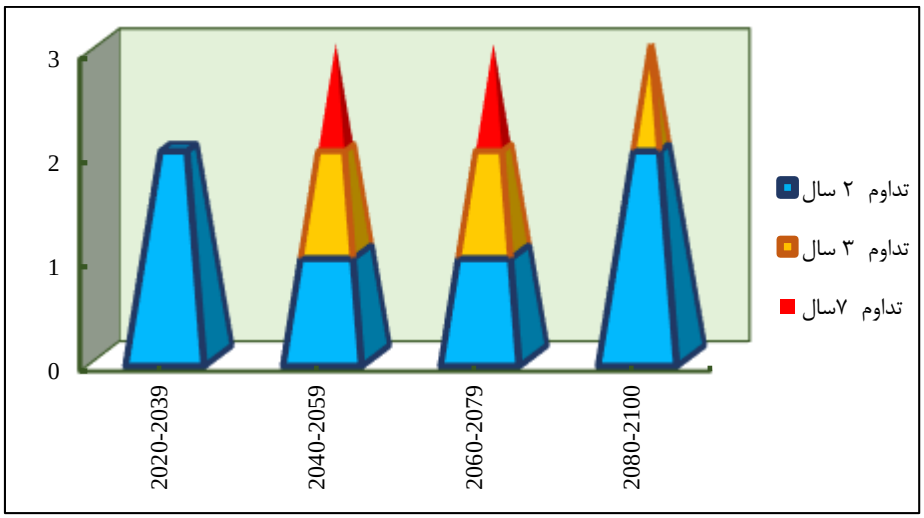
شکل-۸: فراوانی وقوع انواع خشکسالی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ در تهران براساس سناریوی بدبینانه

با مطالعه فراوانی تداوم‌های بیشتر از دو سال نیز مشخص گردید که در سناریوی خوش بینانه از دوره اول تا سوم تعداد تداوم های خشکسالی در حال افزایش است اما در دوره چهارم با اینکه تعداد تداوم ها کاهش خواهد یافت اما یک دوره خشکسالی با تدوام پنج ساله رخ می‌دهد(شکل ۹).



شکل-۹: فراوانی تداوم‌های بیشتر از دو سال رخداد خشکسالی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ تحت سناریوی خوش بینانه

مطابق سناریوی بدبینانه -برخلاف سناریوی خوش بینانه - فراوانی تداوم‌ها در حال افزایش است به طوریکه در دوره اول تنها دو رخداد خشکسالی با تداوم دو سال دیده می‌شود و در سه دوره دیگر تعداد تداوم ها به سه می‌رسد. همچنین در دوره‌های میانی یا به عبارتی در هریک از دوره‌های ۲۰۵۹-۲۰۴۰ و ۲۰۷۹-۲۰۶۰ یک دوره خشکسالی با تداوم هفت سال به وقوع خواهد پیوست(شکل ۱۰). بنابراین می‌توان بیان نمود که پیش نگری ها حاکی از آن است که دوره‌های تداوم خشکسالی در سناریوی بدبینانه نسبت به سناریوی خوش بینانه طولانی‌تر می‌باشد.



شکل-۱۰: فراوانی تداوم‌های بیشتر از دو سال رخداد خشکسالی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۰ تحت سناریوی بدبینانه

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش پیش آگاهی وقوع رخداد خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم در تهران با استفاده از داده‌های فاز ششم CMIP6 مورد مطالعه قرار گرفت. در حقیقت انگیزه اصلی از انجام این مطالعه، بررسی اولیه از میزان توانمندی مدل‌های CMIP6 در شبیه سازی بارش در دوره تاریخی و سپس پیش نگری خشکسالی براساس دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه در دهه‌های آینده می‌باشد. نتایج نشان داد که از بین سه مدل BCC-CSM2-MR, GFDL-CM4 و MRI-ESM2-0 که در حال حاضر داده های بارش آن ها در دسترس قرار گرفته است، مدل BCC پس از انجام تصحیحات کمترین خطا را نسبت به داده‌های ایستگاه در طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۱ نشان داده و دو مدل BCC و MRI بالاترین همبستگی ها را که حدود ۰/۴۵ با سطح معناداری ۰/۹۹ می باشد را نشان می دهد. بنابراین جهت بررسی بارش و خشکسالی در طی سال‌های آینده از بین سه مدل فوق مدل BCC که دارای کمترین خطا و بیشترین همبستگی می‌باشد انتخاب گردید.

پیش نگری بارش به صورت دهه‌ای در طی سال های آینده حاکی از آن است که میانگین بارش در دوره ی ۲۱۰۰-۲۰۲۰ تحت سناریوی بدبینانه نسبت به دوره تاریخی مقداری (۸ میلی متر) کمتر خواهد شد. در حالی که در سناریوی خوش بینانه میانگین بارش مقدار کمی افزایش خواهد یافت. همچنین بررسی نشان داد که اگر چه مقدار بارش در طی دهه‌های آینده روند کاهشی دارد اما این روند معنادار نیست و بارش نوسانات زیادی را تجربه خواهد نمود.

پیش آگاهی شدت و مدت خشکسالی تهران تحت دو سناریوی مورد بحث حاکی از آن است که در هر دو سناریو شدت خشکسالی تا سال ۲۱۰۰ دارای نوسانات زیادی است و روند افزایشی خاصی را تجربه نخواهد نمود اما با این حال در سناریوی بدبینانه بر شدت خشکسالی‌ها افزوده خواهد شد. همچنین مطابق سناریوی خوش بینانه بین دو شاخص SPI و MCZI و دو شاخص ZSI و RAI در برآورد خشکسالی تفاوت وجود دارد در حالی که مطابق سناریوی بدبینانه بین چهار شاخص در برآورد خشکسالی اتفاق نظر وجود دارد و تمام چهار شاخص، خشکسالی از نوع بسیار شدید در دهه‌های ۲۰۶۰ و ۲۰۷۰ را پیش نگری می کنند. همچنین با بررسی فراوانی وقوع خشکسالی ها مشخص گردید فراونی وقوع خشکسالی تحت سناریوی خوش بینانه در دوره های آینده افزایش خواهد یافت اما براساس سناریوی بدبینانه فراوانی وقوع دو دوره بیست ساله ۲۰۵۹-۲۰۴۰ و ۲۰۷۹-۲۰۶۰ افزایش و سپس کاهش خواهد یافت. همچنین پیش نگری تداوم دوره‌های خشکسالی نیز مشخص نمود که تداوم خشکسالی در هر دو سناریو دارای نوسان است به طوریکه در سناریوی خوش بینانه طولانی‌ترین خشکسالی در دوره بیست ساله آخر به عبارتی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۰ به مدت ۵ سال به وقوع خواهد پیوست در حالی که در سناریوی بدبینانه طولانی ترین تداوم‌ها به مدت هفت سال و در دو دوره ی ۲۰۵۹-۲۰۴۰ و ۲۰۷۹-۲۰۶۰ دیده می‌شود و سپس در دهه های آخر قرن حاضر مجددا کاهش می‌یابد. شایان ذکر است نتایج این مطالعه بر مبنای برون داد مدل های پیش نگری اقلیمی تحت شرایط تغییر اقلیم به دست آمده است. نتایج صرفا می تواند به عنوان یک پیش آگاهی از وضعیت اقلیم آینده باشد و همراه با عدم قطعیت است و هر چه از آینده نزدیک دورتر شویم عدم قطعیت بیشتر می گردد.

۴. مراجع

1. Zhang, X., Zou, Z., Gong, P., Zhang, J., Ziaf, K., Li, H., & Ye, Z. (2011). Over-expression of microRNA169 confers enhanced drought tolerance to tomato. Biotechnology letters, 33(2), 403-409.

2. Ukkola, A. M., Pitman, A. J., De Kauwe, M. G., Abramowitz, G., Herger, N., Evans, J. P., & Decker, M. (2018). Evaluating CMIP5 Model Agreement for Multiple Drought Metrics. Journal of Hydrometeorology, 19(6), 969-988.

3. Githui, F., Gitau, W., Mutua, F., & Bauwens, W. (2009). Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 29(12), 1823-1834.

4. Carvalho, L. M., & Jones, C. (2013). CMIP5 simulations of low-level tropospheric temperature and moisture over the tropical Americas. Journal of Climate, 26(17), 6257-6286.

5. Wang, L., & Chen, W. (2014). A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. International Journal of Climatology, 34(6), 2059-2078.

6. Krasting, J. P., Broccoli, A. J., Dixon, K. W., & Lanzante, J. R. (2013). Future changes in Northern Hemisphere snowfall. Journal of Climate, 26(20), 7813-7828.

7. Seiler, C., Hutjes, R. W., & Kabat, P. (2013). Likely ranges of climate change in Bolivia. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(6), 1303-1317.

8. Wuebbles, D., Meehl, G., Hayhoe, K., Karl, T. R., Kunkel, K., Santer, B., & Goodman, A. (2014). CMIP5 climate model analyses: climate extremes in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 95(4), 571-583.

9. Ouyang, F., Zhu, Y., Fu, G., Lü, H., Zhang, A., Yu, Z., & Chen, X. (2015). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. Stochastic environmental research and risk assessment, 29(7), 1781-1795

10. Asharaf, S., & Ahrens, B. (2015). Indian summer monsoon rainfall processes in climate change scenarios. Journal of Climate, 28(13), 5414-5429.

11. Lynch, C., Seth, A., & Thibeault, J. (2016). Recent and projected annual cycles of temperature and precipitation in the northeast United States from CMIP5. Journal of Climate, 29(1), 347-365.

12. Dixon, R. D., Daloz, A. S., Vimont, D. J., & Biasutti, M. (2017). Saharan heat low biases in CMIP5 models. Journal of Climate, 30(8), 2867-2884.

13. Dunning, C. M., Black, E., & Allan, R. P. (2018). Later Wet Seasons with More Intense Rainfall over Africa under Future Climate Change. Journal of Climate, 31(23), 9719-9738.

۱۴. رضایی، مریم؛ نهتانی، محمد؛ آبکار، علیجان؛ رضایی، معصومه، میرکازهی ریگی، مهری. (۱۳۹۲). بررسی کارایی مدل ریز مقیاس نمایی آماری (SDSM)در پیش بینی پارامترهای دمایی در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم). مدیریت حوزه آبریز، ۵(۱۰)، ۱۱۷-۱۳۱.

۱۵. دسترنج، علی؛ شهبازی، علی؛ محسنی ساروی، محسن؛ صالحنسب، ابوطالب، جعفری، شیرکو، (۱۳۹۵)، مدل‌سازی اقلیم و مقایسه تغییرات پارامترهای اقلیمی در جبهه شمالی و جنوبی البرز با استفاده از مدل SDSM، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۰(۳۲)، ۱۰-۲۶.

۱۶. قهرمان، نوذر؛ بابائیان، ایمان؛ طباطبایی، سید محمدرضا، (۱۳۹۵). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و طول دوره رشد گیاه نیشکر تحت سناریوهای واداشت تابشی، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۶(۱)، ۶۳-۷۳.

۱۷. قهرمان، نوذر؛ بابائیان، ایمان؛ طباطبایی، سید محمدرضا، (۱۳۹۵). ارزیابی پس پردازش برون دادهای دینامیکی مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل تحت سناریوهای واداشت تابشی (بررسی موردی: دشت مشهد)، فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۸۷-۶۹۶.

۱۸.کوهستانی، شاپور؛ اسلامیان، سید سعید؛ بسالت پور، علی اصغر (۱۳۹۶)، تاثیر تغیر اقلیم بر درجه حرارت حوضه آبریز زاینده رود با استفاده از محاسبات نرم یادگیری ماشینی بیزین، علوم آب و خاک، ۲۱(۱)، ۲۰۳-۲۱۶.

۱۹.رحیمی، داریوش؛ هاشمی نسب، سادات (۱۳۹۷)، تحلیل واکنش هیدرولوژی حوضه کارون شمالی به افزایش دمای کمینه، پژوهش های جغرافیای طبیعی، ۵۰ (۱)، ۱-۱۷.

۲۰. معصوم پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی، پورکمر، فاطمه (۱۳۹۶)،ارزیابی داده های مدل های اقلیمی CMIP5 در مقابل داده های مشاهده ای ایران، ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۴)، ۴۰-۵۳.

۲۱زارع زاده مهریزی، شهاب‌الدین؛ خورانی، اسداله؛ بذر افشان، جواد؛ بذرافشان، ام‌البنین (۱۳۹۷)، ارزیابی تغییرات جریان آینده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب، اکوهیدرولوژی، ۵(۳)، ۷۷۷-۷۸۹.

۲۲. صالح‌نیا، نسرین. (۱۳۹۶)، توسعه یک سامانه ی پایش و پیش بینی خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از داده های هواشناسی، شبکه بندی شده و خروجی های یک مدل عددی در حوضه آبریز کشف رود، رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد