

مقاله علمی-پژوهشی

پایش و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI براساس گزارش ششم IPCC (مطالعه موردی شهر تهران)

راضیه موسوی حصاری^۱، محمد حسین جهانگیر^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

چکیده

امروزه تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی در قرن ۲۱ شناخته می‌شود. گرمایش زمین هم‌زمان با کاهش در میزان بارش اثرات تغییر اقلیم را شدیدتر کرده است. هدف از انجام این مطالعه پایش و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI براساس گزارش ششم IPCC می‌باشد. برای انجام پژوهش، برون‌داد ۱۱ مدل از مدل‌های GCM در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۴) مورد بررسی قرار گرفت. داده‌کاوی توسط نرم‌افزار CMhyd صورت گرفت. به منظور ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در مقایسه با داده‌های مشاهداتی از معیارهای آماری RMSE، MSE، MAE و R^2 و برای اعتبارسنجی و تصمیم‌گیری در انتخاب مدل از سنجه‌های نش-سانتکلیف و گلینگ گوتتا بهره گرفته شد. پیش‌بینی آینده با استفاده از سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در بازه زمانی (۲۰۲۳-۲۰۴۳) صورت گرفت. در نهایت ۳ مدل EC-Earth3، EC-Earth3-Veg و Earth3-Veg به عنوان مدل برتر شناسایی شدند. که بالاترین هم‌پوشانی را با داده‌های مشاهداتی تهران داشتند. برای پیش‌بینی خشکسالی آینده از شاخص SPI بهره گرفته شد. نتایج پژوهش نشان داد در سال‌های آتی به‌جز برخی سال‌ها، بارش‌ها افزایش چشم‌گیری نخواهند داشت. نتایج پیش‌بینی براساس مدل EC-Earth3-Veg در تمام سناریو افزایش بارش در ژانویه (دی) و کاهش بارش‌ها در دسامبر (آذر) و براساس مدل GFDL-ESM4 افزایش بارش در فوریه (بهمن) براساس سناریوی SSP1-2.6 و کاهش بارش در می (اردیبهشت) براساس تمام سناریوها و افزایش بارش در دسامبر (آذر) براساس تمام سناریوها رخ خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیم، سناریوهای SSP، شاخص خشکسالی هواشناسی SPI، نرم‌افزار CMhyd

مقدمه

کره زمین ایجاد کنند (Ashrafzadeh et al., 1401). تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند به‌طور طبیعی رخ دهد یا در اثر فعالیت‌های انسانی ایجاد شود (Patel et al., 2010). مهم‌ترین فعالیت انسانی که منجر به تغییرات آب‌وهوایی می‌شود، انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است (Hertzberg et al., 2017; Narimisa and Narimisa, 2018). کشور ایران در منطقه کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار گرفته است و به‌دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و ویژگی‌های توپوگرافیکی دارای آب و هوای متنوعی می‌باشد و مقدار بارندگی منطقه بسیار کم‌تر از متوسط جهانی می‌باشد. شهر تهران با توجه به محدود بودن منابع تأمین آب و افزایش جمعیت در سال‌های گذشته با شدیدترین خشکسالی‌ها مواجه بوده است. اگر تأثیرات افزایش جمعیت و تغییر اقلیم در آینده مدنظر قرار نگیرد، این کمبودها می‌تواند تبدیل به بحرانی گسترده گردد (Shams, 2015; Alimohammadi and). امروزه تغییر اقلیم به جدی‌ترین معضل شهرهای جهان تبدیل شده و باعث شده که میانگین دمای کره زمین،

انقلاب صنعتی از اوایل قرن نوزدهم آغاز شد و با رشد جمعیت و توسعه انسانی، تغییرات مختلفی در زندگی بشر رخ داد. نیاز انسان به انرژی و مصرف سوخت‌های فسیلی مانند نفت، ذغال سنگ و گاز طبیعی باعث افزایش چشمگیر گازهای مانند دی‌اکسید کربن، متان و دیگر گازهای گلخانه‌ای در جو شده است. پدیده تغییر اقلیم یکی از تبعات آن می‌باشد (Stevens and Senbel, 2017). تغییرات اقلیمی، گرمایش زمین و خشکسالی از مهم‌ترین مشکلات کنونی جهان به‌شمار می‌آیند و ممکن است تغییرات گسترده‌ای در شرایط اقلیمی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده‌گان علوم و فناوری‌های میان‌رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(mh.jahangir@ut.ac.ir)

(*- ایمیل نویسنده مسئول)

سه بعدی جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو^۱ AOGCM، معتبرترین ابزار تولید سناریوهای اقلیمی می باشد (Espinosa et al., 2022). مدل های گردش عمومی^۲ (GCM)، بر مبنای فیزیک، دینامیک سیالات، شیمی و غیره ساخته شده اند (Flato et al., 2014). این مدل ها قادرند عوامل جوی و اقیانوسی را برای دوره ای بلندمدت با استفاده از سناریوهای تأیید شده هیئت بین دولتی تغییر اقلیم مدل سازی نمایند (Mitchell 2003). در گزارش اخیر IPCC جدیدترین مدل های تغییر اقلیم با عنوان مدل های سری CMIP6^۳ می باشند که اقلیم آینده را تحت سناریوهای انتشار SSP^۴ شبیه سازی می کنند. در مدل های اقلیمی فاز ششم از تلفیق خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک در کنار خط سیرهای 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 (Riahi et al., 2017). با توجه به پژوهش او نیل، SSPها شرایط آینده را بر اساس پنج رویکرد بنیادین توسعه پایدار (SSP1)، توسعه مبتنی بر سیاست های بنیادین (SSP2)، گسترش رقابت منطقه ای (SSP3)، نابرابری (SSP4) و توسعه کاربرد سوخت های فسیلی (SSP5) توصیف می کنند (O'Neill et al., 2016). با توجه به مطالب فوق، واضح است که مطالعه و پیش بینی خشکسالی در شهر تهران کمک قابل توجهی به منظور برنامه ریزی های بلندمدت و مدیریت صحیح اثرات نامحسوس و طولانی این بلای طبیعی خواهد داشت. در زمینه خشکسالی و مدل های اقلیمی مطالعات گوناگونی در ایران و جهان صورت گرفته است. سلیمی و همکاران به بررسی خشکسالی و انتخاب مناسب ترین شاخص با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در ایران پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد شاخص SPI مناسب ترین شاخص پیش بینی خشکسالی در شهر تهران است (Salimi et al., 2023).

پانیکراهی و ویدیارتی به شناسایی کاربردی ترین شاخص خشکسالی هواشناسی در منطقه رایگر چاتیسگر پرداختند و نتایج پژوهش آنها نشان داد که شاخص SPI عملکرد بسیار خوبی در ثبت شرایط خشکسالی در بین سایر شاخص های در نظر گرفته شده در این مطالعه دارد (Panigrahi and Vidyarthi, 2024). تساکریس و ونجلیس پایش خشکسالی با استفاده از شاخص SPI را بررسی کردند و نتایج بررسی آنها نشان داد که این روش به راحتی قابل استفاده است و از سیستم مراقبت خشکسالی برای منطقه ای در مقیاس میان مدت حمایت می کند (Tsakiris and Vangelis, 2004).

روندی افزایشی نشان دهد. یکی از پیامدهای افزایش دما، خشکسالی است. خشکسالی یکی از مهم ترین بلایای طبیعی، هزینه های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی زیادی را برای شهرها همراه دارد (Zargar et al., 2011). اگرچه هیچ راهی برای پیشگیری از این بلایای طبیعی وجود ندارد و حداقل ۵۱ درصد از سالها در کشور با درجات مختلف خشکسالی مواجه هستیم، اما می توان بر شرایط کنونی فائق آمد و اقدامات مؤثری برای برون رفت از آن ارائه کرد. با مدیریت بحران و برنامه های کاهش خشکسالی از خسارت های حاصل از آن بکاهیم (Zhang et al., 2019). برای ارزیابی خشکسالی، شاخص های خشکسالی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشند. شاخص های متعددی وجود دارند که گویای وضعیت خشکسالی در منطقه ای باشد، هرچند که هیچ کدام بر دیگری ارجحیت ندارند ولی در برخی شرایط بعضی از آنها بهتر عمل می کنند. شاخص های خشکسالی معمولاً توابعی از بارش، دما، دی های رودخانه یا متغیرهای دیگر قابل اندازه گیری هیدرولوژیکی هستند (Shukla and Wood, 2008). شاخص های خشکسالی هواشناسی معمولاً بر اساس بارش اندازه گیری می شوند (Van Loon and Laaha, 2015). هدف از محاسبه شاخص خشکسالی تعیین ساده و کمی سه ویژگی شدت، مدت و گستردگی مکانی آن است (Mendicino et al., 2008). مقدار خشکسالی با شاخص های خشکسالی مشخص می گردد. بیشتر برنامه ریزان زمینه خشکسالی از شاخص SPI به علت انعطاف پذیریش استفاده می کنند. این شاخص به منظور پایش شدت و هشدار اولیه خشکسالی اهمیت زیادی دارد (Vicente-Serrano and López-Hisdal et al., 2001; Moreno, 2005). کشور ایران در منطقه کمربند خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته است و به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و ویژگی های توپوگرافیکی دارای آب و هوای متنوعی می باشد و مقدار بارندگی منطقه بسیار کم تر از متوسط جهانی می باشد. شهر تهران با توجه به محدود بودن منابع تأمین آب و افزایش جمعیت در سال های گذشته با شدیدترین خشکسالی ها مواجه بوده است. اگر تأثیرات افزایش جمعیت و تغییر اقلیم در آینده مدنظر قرار نگیرد، این کمبودها می تواند تبدیل به بحرانی گسترده گردد (Alimohammadi and Shams, 2015). مناطق شهری، مانند تهران به عنوان پایتخت کشور با تراکم بالای جمعیت و ابعاد سیاسی و اجتماعی اهمیت ویژه ای دارد. به منظور شناسایی شرایط هیدرولوژیکی منطقه و پیش بینی آن در آینده و برنامه ریزی منابع آب در دسترس، لازم است که درک درستی از تغییرات آب و هوایی در مکان و زمان وجود داشته باشد (Houshmand Kouchi et al., 2019). دانشمندان به منظور مدل سازی و پیش بینی آب و هوای آینده کره زمین اقدام به تولید سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه ای نموده اند تا بر اساس سناریوها تغییر اقلیم را شبیه سازی نمایند. در حال حاضر مدل های

1- Atmosphere – Ocean General Circulation Model

2- General Circulation Model

3- Coupled Model Intercomparison Project Phase6

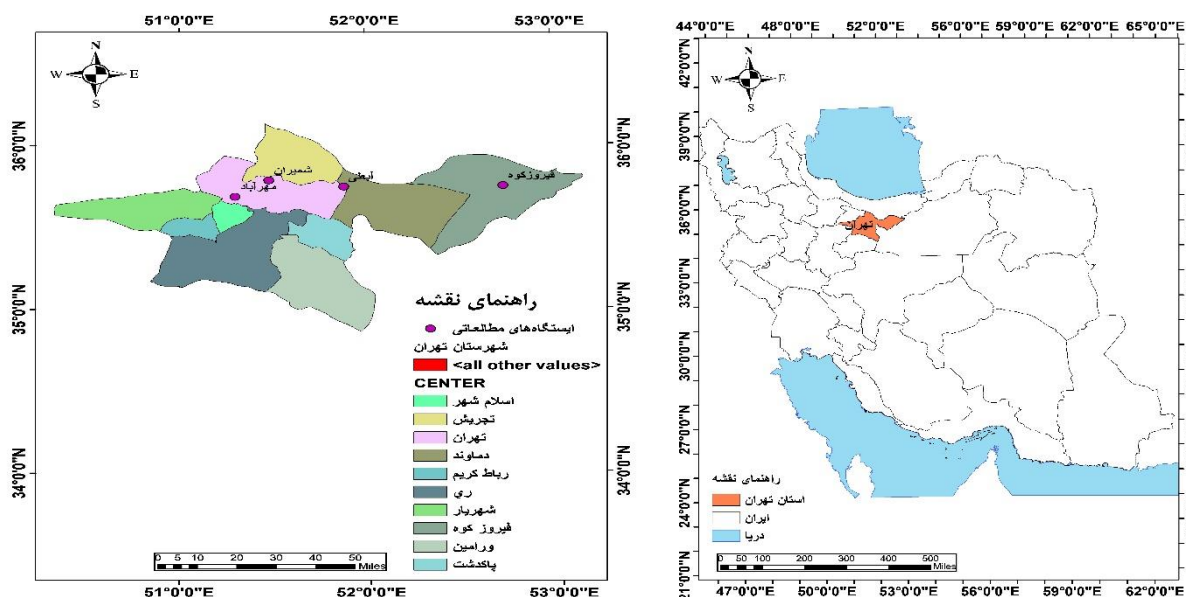
4- Shared Socioeconomic Pathways

یک مخاطره پیچیده اقلیمی است که جامعه را به طرق مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد. علی‌رغم پیشرفت‌ها در مدل‌های CMIP5 و حتی در CMIP6، عدم قطعیت پیش‌بینی‌های اقلیمی از وضعیت آینده همچنان بالاست. بررسی پیشینه این پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات مربوط به پیش‌بینی خشکسالی و شاخص‌های آن نیازمند بررسی دقیق‌تر همراه با ارائه مدل‌هایی با عدم قطعیت پایین‌تر است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در مناطق مختلف ایران از جمله شهر تهران، روند تغییرات دما افزایشی و روند تغییرات بارش، کاهش یافته است و تعدادی از محققین نیز در مطالعات خود به این مسئله اشاره نموده‌اند (Zarrin et al., 2021; Yousefi et al., 2024; Choobari and Najafi, 2017; Binesh et al., 2021). به دلیل این که بیشتر مناطق ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک هستند، تغییر هرچند جزئی در مقدار بارش ناشی از گرمایش می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر محیط‌زیست و کشاورزی داشته باشد. پژوهش‌های گوناگون نشان داده‌اند که شهرنشینی و پیامدهای ناشی از آن، سبب تغییرات گسترده در پارامتر تعداد روزهای بارش و شدت بارش می‌شوند. بنابراین هدف اصلی این پژوهش پیش‌بینی خشکسالی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی با استفاده از داده‌های گزارش ششم IPCC ملقب به CMIP6 در شهر تهران می‌باشد. یافته‌های حاصل از این پژوهش می‌تواند تأثیر بسزایی در برنامه‌ریزی‌های مرتبط با تغییر اقلیم و به‌کارگیری راهکارهای مناسب به‌منظور افزایش تاب‌آوری، سازگاری با شرایط تغییر اقلیم و مدیریت صحیح منابع آب در آینده داشته باشد.

منطقه مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر استان تهران می‌باشد. استان تهران با وسعتی حدود ۱۳۰۶۸۸ کیلومتر مربع از استان‌های مرکزی ایران در جنوب بخش مرکزی رشته‌کوه البرز قرار دارد. شهر تهران در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه به‌دست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این استان حدود ۲۳۳ میلی‌متر برآورد شده است. استان تهران تحت پوشش قسمت‌هایی از چهار حوزه سفیدرود، ساحلی خزر، دریاچه نمک و کویر مرکزی قرار می‌گیرد. با این حال بیشترین محدوده استان در حوزه دریاچه نمک (۶۹ درصد مساحت استان) واقع شده است. ایستگاه مهرآباد، ابعلی، شمیران و فیروزکوه به عنوان ایستگاه‌های مطالعاتی انتخاب شدند. در شکل ۱ موقعیت استان تهران، شهرستان‌ها و ایستگاه‌های مطالعاتی نشان داده شده است.

کانسلیر و همکارانش تحقیقاتی را در زمینه پایش و پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI را انجام دادند و نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که این شاخص کاربردهای مهمی در مدیریت ارزیابی خشکسالی دارد (Cancelliere et al., 2007). ادامه گرمایش جهانی خطر خشکسالی را در سراسر جهان افزایش داده است. بنابراین استفاده از مدل‌های آب‌وهوای جهانی (GCMs) برای شبیه‌سازی دقیق خشکسالی و تحلیل بلندمدت ضروری است، بسیاری از محققان در تحقیقات خود از داده‌های ششمین گزارش IPCC استفاده کرده‌اند که به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. زرین و صالح‌آبادی در مطالعه‌ای پیش‌بینی خشکسالی در تهران براساس مدل‌های CMIP6 را بررسی کردند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد: خشکسالی افزایش خواهد یافت (Zarrin and Salehabadi, 2019) میان‌آبادی و همکاران در پژوهشی اثرات تغییر اقلیم بر توزیع بارندگی و دما با استفاده از مدل‌های اقلیمی گزارش ششم IPCC در ایستگاه سینوپتیک کرمان را مورد بررسی قرار دادند و طبق نتایج این پژوهش، بارش حدی و تنش گرمایی بیشتر را نشان دادند (Mianabadi et al., 2023). چمانه‌فر و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی و پیش‌بینی شاخص‌های آستانه براساس خروجی مدل‌های CMIP6 پرداختند. نتایج نشان دادند از بین مدل‌های انتخاب‌شده، مدل ACCESS-CM2 بهترین توانایی شبیه‌سازی را دارد (Chamanehfar et al., 2022). در مطالعه‌ای نیرومندفر و همکاران پیش‌نگری پارامترهای دما و بارش بر تغییرات آب‌وهوایی با استفاده از مدل‌های CMIP6 پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد: دمای حداکثر و حداقل در دوره آینده دارای روندی افزایشی است و پارامتر بارش در بعضی ماه‌ها افزایشی و در بعضی ماه‌ها کاهش یافته است (Niroumandfar et al., 2022). بابائیان و همکاران در مطالعه‌ای چشم‌انداز بارندگی ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مدل‌های CMIP6 توسط نرم‌افزار CMhyd را مورد بررسی قرار دادند (Babaeian et al., 2023). عبدالعلی‌زاده و همکاران در تحقیقات خود دقت مدل‌های گزارش ششم را برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بررسی کردند و نتایج نشان دادند که بین داده‌های ایستگاهی و تصحیح شده برای دما در کل حوضه مطالعاتی رابطه خطی قوی و برای بارش رابطه خطی ضعیف برقرار است (Abdolizadeh et al., 2022). احمد و همکاران به بررسی خشکسالی در تبت چین پرداختند و هدف آن‌ها استفاده از داده‌های GCM بود (Ahmad et al., 2023). آکینسانولا و همکاران ارزیابی مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی بارش‌های شدید در شرق آفریقا را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند مدل واحدی وجود ندارد که مکرراً بهترین عملکرد را داشته باشد، عملکرد مدل با شاخص و فصل مورد بررسی متفاوت است (Akisanola et al., 2021). خشکسالی



شکل ۱- موقعیت استان تهران و ایستگاه‌های مطالعاتی

روش کار

در این پژوهش به منظور ارزیابی خشکسالی هواشناسی و استخراج دوره‌های تر و خشک از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و از داده‌های بارش در مقیاس ماهانه و به منظور داده‌کاوی داده‌های گزارش ششم IPCC برای پیش‌بینی خشکسالی و مطابقت آن با داده‌های جهانی و انتخاب بهترین مدل جهانی متناسب با شهر تهران از داده‌های بارش روزانه در بازه زمانی (۱۹۹۴-۲۰۱۴) استفاده گردید. برای بررسی و پیش‌بینی آینده از برون‌داد مدل‌های گزارش ششم در بازه زمانی (۱۹۹۴-۲۰۱۴) و داده‌های آینده (SSP) در بازه زمانی (۲۰۲۳-۲۰۴۳) بهره گرفته شد. لذا اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک محدوده‌ی مطالعاتی از اداره کل هواشناسی استان اخذ گردید. پس از آن دیتاها مرتب و بررسی شدند و ایستگاه‌هایی که نواقص آماری داشتند برطرف کامل شدند.

مشخصات ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. در پژوهش حاضر با توجه به موقعیت محدوده مورد مطالعه، در ابتدا از بین مدل‌های CMIP6، آن دسته از مدل‌هایی که دارای داده‌های روزانه بارش با دوره‌های مشترک تاریخی و پیش‌نگری با تفکیک مکانی

افقی ۱۰۰ کیلومتر بودند، انتخاب شدند. آن گاه داده‌های تاریخی متغیر بارش ۱۱ مدل از مدل‌های GCM در بازه زمانی پایه (۱۹۹۴-۲۰۱۴) و از چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به عنوان (سناریوی خوشبینانه، حد واسط، بدبینانه و خیلی بدبینانه) در بازه زمانی آینده (۲۰۲۳-۲۰۴۳) جهت پیش‌بینی آینده از سایت <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> استخراج شدند. مشخصات

مدل‌های استخراج شده در جدول ۲ آورده شده است.

به منظور ارزیابی دقت داده‌های مدل‌های CMIP6 در مقایسه با داده‌های مشاهداتی از معیارهای آماری RMSE، MSE، MAE و R^2 استفاده شده است.

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (X_K - Y_K)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{K=1}^K (X_K - Y_K)^2}}{K} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{K=1}^K |X_K - Y_K|}{K} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{K=1}^K X_K Y_K}{\sqrt{\sum_{K=1}^K X_K^2 \sum_{K=1}^K Y_K^2}} \quad (4)$$

جدول ۱- اطلاعات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان تهران

نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول دوره آماری	ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
آبلی	۴۰۷۵۵	۲۰۱۴-۱۹۹۴	۲۴۶۵	۳۵/۷۵	۵۱/۸۸
فیروزکوه	۴۰۷۵۶	۲۰۱۴-۱۹۹۴	۱۹۷۵/۶	۳۵/۷۵	۵۲/۷۳
مهرآباد	۴۰۷۵۴	۲۰۱۴-۱۹۹۴	۱۱۹۱	۳۵/۶۹	۵۱/۳۰
شمیران	۴۰۷۵۱	۲۰۱۴-۱۹۹۴	۱۵۴۹/۱	۳۵/۷۹	۵۱/۴۸

جدول ۲- مشخصات مدل‌های GCM مورد استفاده در پژوهش

کشور	مؤسسه	نام مدل
EUROPE	EC - Earth consortium	EC-EARTH3
EUROPE	EC - Earth consortium	EC-EARTH3-VEG
USA	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-ESM4

نرم‌افزار CMhyd^۱

برونداد مدل‌های گردش عمومی به دلیل وضوح کم آن‌ها قابل استفاده برای مطالعات کاربردی در مقیاس منطقه‌ای و ایستگاهی نیستند، لذا آن‌ها نیازمند مقیاس‌کاهی تا سطح ایستگاه می‌باشند. در این مطالعه از نرم‌افزار CMhyd به علت برخورداری از هشت روش مختلف مقیاس‌کاهی، اجرای سریع و هزینه‌ی کم محاسباتی برای مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های منتخب CMIP6 استفاده شد. این مدل یکی از پرکاربردترین ابزارهای آماری مقیاس‌کاهی می‌باشد، که کاربرد بسیاری در مطالعات هواشناسی، هیدرولوژیکی، جغرافیایی و زیست‌محیطی دارد (Millman and Van Der Walt et al., 2011; Aivazis, 2011). این نرم‌افزار برای مدل‌سازی هیدرولوژی توسط راجنز در دانشگاه پردو آمریکا در محیط پایتون توسعه داده شده است که اغلب برای تصحیح آریبی داده‌های مقیاس‌کاهی شده دینامیکی از قبیل داده‌های CORDEX به کار می‌رود. در فرایند تصحیح آریبی الزاماً کاهش مقیاس انجام نمی‌شود و تفکیک مکانی داده‌های تصحیح شده با داده‌های خام مشابه است (Rathjens et al., 2016). اجرای سریع و امکان انتخاب گزینه‌های مختلف از مزایای این نرم‌افزار است. هشت روش مقیاس‌کاهی بارش (۵ روش) و دما (۴ روش) در مدل CMhyd مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های تصحیح آریبی در بخش Select bias-correction method صورت گرفت. در این پژوهش از دو روش: ۱- Linear Scaling (LS) توسط مندز و همکاران ۲- Power Transformation (PT) توسط لیاندر و بوئیشند به منظور مقیاس‌کاهی استفاده گردید (Mendez et al., 2020; Leander and Buishand, 2007).

نتایج و بحث

در مطالعات تغییرات اقلیمی به ندرت از برونداد مدل‌های اقلیمی به طور مستقیم استفاده می‌شوند زیرا این مدل‌ها دارای خطای سیستماتیک (آریبی‌ها) می‌باشند. خطاها در شبیه‌سازی این مدل‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی بزرگ هستند. به همین منظور از روش‌های مقیاس‌کاهی^۲ یا تصحیح آریبی استفاده می‌شود. مقیاس‌کاهی نوعی تصحیح آریبی است که وضوح اقلیمی متغیر اقلیمی را افزایش می‌دهد. برای تصحیح آریبی برونداد مدل‌های

در روابط فوق X_k داده‌های مشاهداتی، Y_k داده‌های شبیه‌سازی شده و k تعداد داده‌ها است. نتایج محاسبه معیارهای آماری ایستگاه مهرآباد براساس دو روش اصلاح آریبی در جدول ۳ آورده شده است. همچنین برای اعتبارسنجی، تحلیل و همچنین کمک در تصمیم‌گیری بهتر انتخاب مدل از سنجه‌های نش-ساتکلیف و کلینگ-گوپتا استفاده و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی نش-ساتکلیف و کلینگ-گوپتا عدد ۱ است که نشان دهنده تطابق کامل سری‌ها است (Gupta et al., 2009). نتایج اعتبارسنجی ایستگاه مهرآباد در جدول ۴ آورده شده است.

$$NSc = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - e_i^-)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - 0^-)^2} \quad (5)$$

$$KGE = 1 \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (6)$$

در رابطه ۵؛ O_i مقادیر مشاهده شده، e_i^- مقادیر شبیه‌سازی شده، O^- میانگین مقادیر مشاهده شده می‌باشد. در رابطه ۶؛ r ضریب همبستگی داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی، α انحراف‌معیار داده‌های شبیه‌سازی شده به انحراف‌معیار داده‌های مشاهداتی و β میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده به میانگین داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

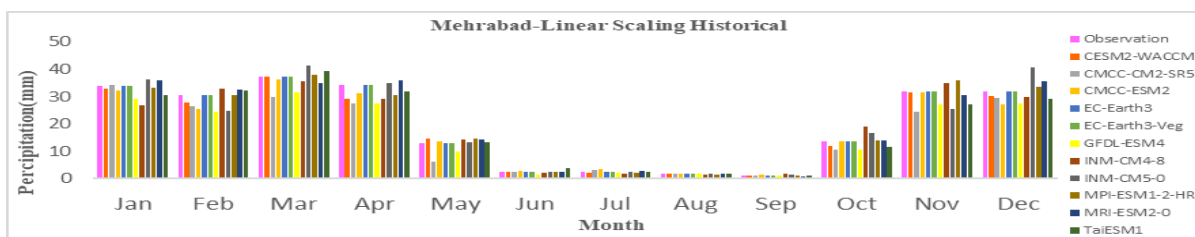
این شاخص نمایه‌ای است که بستگی به احتمال بارش برای هر مقیاس و زمان دارد. این روش توسط مک‌کی، درسکن و جان کلیست و اعضای مرکز اقلیمی کلرادو در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است (McKee et al., 1993). بیشتر برنامه‌ریزان زمینه خشکسالی به علت انعطاف‌پذیری از شاخص SPI استفاده می‌کنند. شاخص بارش استاندارد شده به منظور هشدار اولیه و پایش شدت خشکسالی اهمیت زیادی دارد (Byun and Wilhite, 1999). طبق این روش، خشکسالی زمانی روی می‌دهد که SPI به طور مستمر منفی و به ۱- یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مثبت شود (Hayes et al., 1999). مدت دوره خشکسالی با شروع و خاتمه ارقام منفی آن تعیین می‌شود و مقادیر جمعی SPI نیز بزرگی و شدت دوره خشکسالی را نشان می‌دهد (Bordi and Edwards and McKee, 1997; Sutera, 2004).

1- Climate Model data for hydrologic modeling

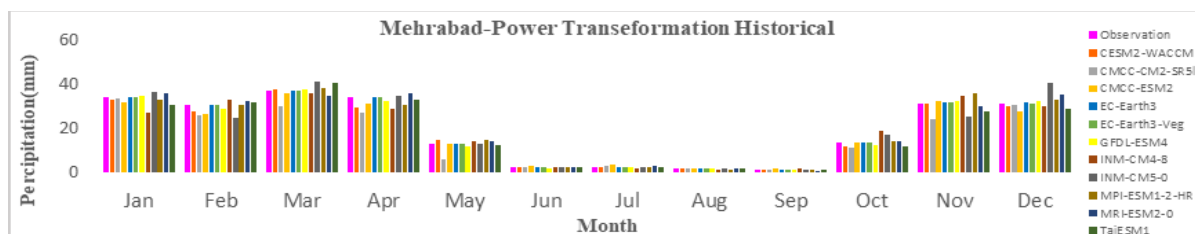
2- Downscaling

2012). لذا با انتخاب روش مناسب از ایجاد خطاهای جدید جلوگیری خواهد شد. یزدانی و همکارانش در پژوهش خود از روش تصحیح اریبی Linear Scaling و روش دیگر بهره گرفتند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد استفاده از این روش به طور قابل توجه خطا را کاهش می‌دهد (Yazdani et al., 2024). ارشادفتح و همکاران و شجاع و شمسی‌پور نیز در پژوهش خود از روش تصحیح اریبی Linear Scaling بهره گرفتند (Ershadfath et al., 2022; Shoja and Shamsipour, 2023). عطایی و همکاران در پژوهش خود از روش تصحیح اریبی بهره بردند (Ataei et al., 2021). با استفاده از نرم‌افزار CMhyd در چهار ایستگاه سینوپتیک مهرآباد، شمیران، آملی و فیروزکوه براساس مدل‌های منتخب گزارش ششم IPCC صورت گرفت. داده‌های خروجی، با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB، تبدیل واحد و وزن دهی شدند و به صورت مجموع ماهانه ذخیره گردیدند. سپس نتایج آن با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت.

اقلیمی، روش‌های متعددی وجود دارد که برخی از آن‌ها محدودیت‌هایی دارند. برخی روش‌ها مانند نسبت‌گیری خطی (Linear Scaling) فقط میانگین مدل‌های اقلیمی را باز تولید می‌کنند. در روش چندک (Distribution Mapping) و روش پارامتری تبدیل توانی (Power Transformation)، میانگین و فراوانی مقدار مدل‌ها با مقادیر آماری ایستگاهی را تصحیح می‌کنند (Teutschbein and Seibert, 2012). در ایران مطالعات متفاوتی از روش‌های تصحیح اریبی به منظور بهبود برونداد مدل‌های اقلیمی بهره برده‌اند. اکثر این مطالعات افزایش کارایی مدل پس از تصحیح اریبی برای بارش و دما را گزارش نموده‌اند (Zarrin and Dadashi-Roudbari, 2021). سانگ و همکاران در پژوهشی برای ارزیابی دما و بارش در کره جنوبی بیان کردند که روش‌های تصحیح اریبی قابلیت نسبی مدل‌ها را بهبود می‌بخشد (Song et al., 2021). در مقابل پژوهش‌های دیگری نایستایی روش‌های تصحیح اریبی را بیان نموده‌اند (Maraun, Wang and Kotamarthi, 2015)



شکل ۲- نمودار نتایج مقیاس‌کاهی روش LS با استفاده از نرم‌افزار CMhyd ایستگاه مهرآباد



شکل ۳- نمودار نتایج مقیاس‌کاهی روش PT با استفاده از نرم‌افزار CMhyd ایستگاه مهرآباد

بالاترین مقدار آن یک در نظر گرفته شده است، در هر سه مدل دارای بالاترین میزان می‌باشد. نتایج صحت‌سنجی نیز مشابه با نتایج داده‌کاوی و نتایج معیارهای آماری است و میزان شاخص نش-ساتکلیف و کلینگ-گوپتا در سه مدل فوق میزان نزدیک به عدد یک و یک می‌باشند که در میان مدل‌های دیگر دارای بالاترین میزان ارزیابی می‌باشند و نشان دهنده تطابق کامل سری‌هاست. در نهایت این سه مدل به عنوان مدل برتر شناسایی شدند. با توجه به این که دو مدل EC-Earth3 هر دو از یک پایگاه داده هستند لذا برای بررسی‌های بعدی استفاده گردید. یزدانی و همکاران در پژوهش خود از مدل EC-Earth3 به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و تفکیک افقی مناسب برای پیش‌نگری دما و کلاکی و همکاران (Fallah Kalaki et

نتایج مقیاس‌کاهی ایستگاه مهرآباد در شکل ۲ و شکل ۳ به عنوان نمونه آورده شده است. با توجه به نتایج داده‌کاوی داده‌های تاریخی در شکل‌های ۲ و ۳، نتایج معیارهای آماری در جدول ۳ و نتایج اعتبارسنجی در جدول ۴ مشاهده می‌شود؛ مدل‌های EC3-Earth و EC-gVe-Earth3 در تمام ماه‌ها دارای بالاترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی هستند و مدل GFDL-ESM4 در اکثر ماه‌ها همبستگی بالایی با داده‌های مشاهداتی دارند. نتایج معیارهای آماری نیز نتایج مشابهی با نتایج داده‌کاوی داشتند. چنانچه هرچه میزان ضریب خطای RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد دارای عملکرد بهتری می‌باشد که در این بررسی میزان آن برای سه مدل نام برده شده دارای کم‌ترین میزان و نزدیک به صفر است و یا ضریب تعیین R^2 که

اقلیمی استفاده نموده‌اند.

ale., 2021)، کوهی و همکاران (Koochi et al., 2022) و زرین و صالح‌آبادی از مدل GFDL-ESM4 برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی تحت تأثیر تغییرات

جدول ۳- نتایج معیارهای آماری مدل‌های GCM در دوره (۲۰۱۴-۱۹۹۴) ایستگاه مهرآباد

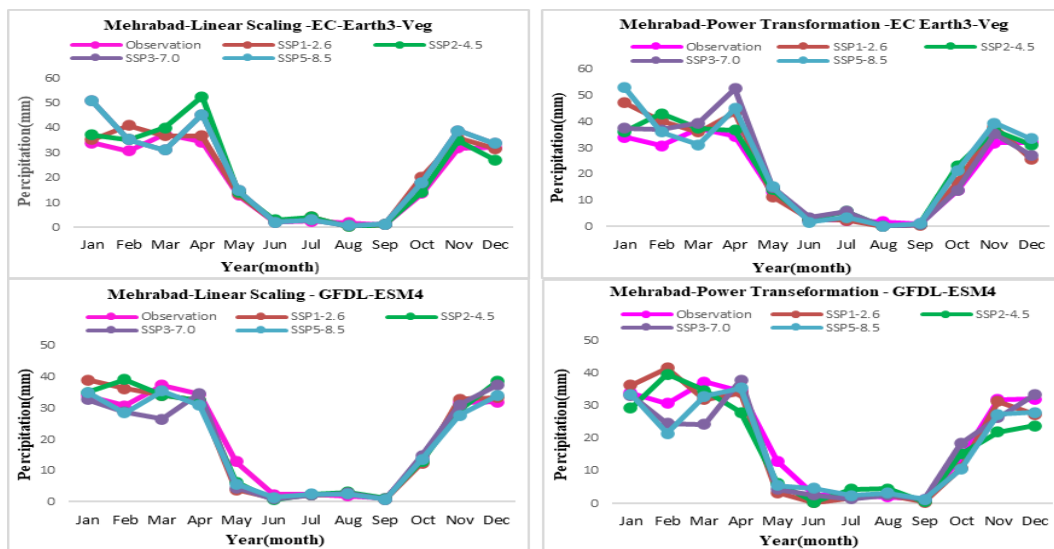
Power Transformation				Linear Scaling			Model Name
R2	MAE	RMSE	MSE	MAE	RMSE	MSE	
۰/۱۲۱	۳/۱۲۰	۲۱/۹۱۲	۴۸۰/۱۱۷	۰/۹۸۹	۰/۹۶۱	۱/۹۱۳	۳/۶۵۹
۰/۹۳۰	-۳/۱۶۰	۴/۶۲۴	۲۱/۳۸۵	۰/۹۶۲	-۳/۰۲۵	۴/۳۲۳	۱۸/۶۸۷
۰/۹۸۱	-۱/۴۰۸	۲/۵۰۴	۶/۲۷۰	۰/۹۸۵	-۱/۳۸۶	۲/۶۰۵	۶/۷۸۴
۰/۹۹۹	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰
۰/۹۹۹	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰
۰/۹۹۵	-۰/۲۶۶	۰/۹۰۴	۰/۸۱۷	۰/۹۹۶	-۳/۴۶۲	۴/۱۷۲	۱۷/۴۰۳
۰/۹۳۰	-۰/۱۰۷	۲/۹۹۳	۸/۹۵۷	۰/۹۵۰	-۰/۵۴۱	۳/۲۶۲	۱۰/۶۴۰
۰/۸۹۵	-۰/۹۵۵	۴/۲۸۹	۱۸/۳۹۹	۰/۹۲۵	۱/۲۱۱	۴/۵۰۷	۲۰/۳۱۴
۰/۹۸۲	-۰/۳۰۵	۱/۷۰۱	۲/۸۹۴	۰/۹۸۷	-۰/۳۵۸	۱/۷۱۱	۲/۹۲۶
۰/۹۸۷	-۰/۳۷۳	۱/۴۹۵	۲/۲۳۴	۰/۹۸۸	-۰/۸۱۱	۱/۸۶۰	۳/۴۶۰
۰/۹۹۳	-۱/۳۴۱	۲/۰۱۹	۴/۰۷۸	۰/۹۸۰	-۰/۹۹۴	۲/۳۲۷	۵/۴۱۴

جدول ۴- نتایج صحت‌سنجی با شاخص NSc و KEG و ضریب همبستگی (R) ایستگاه سینوپتیک مهرآباد

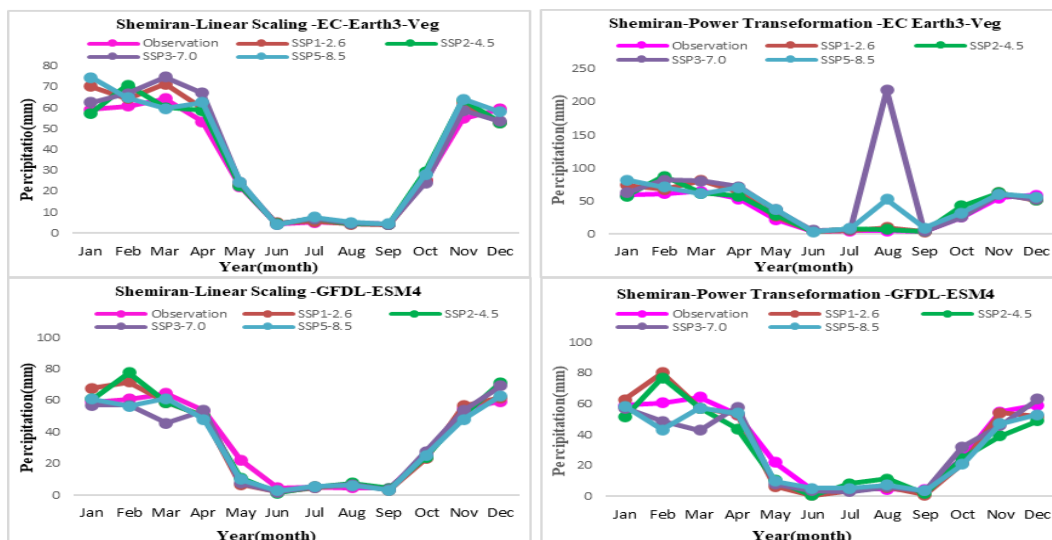
Power Transformation			Linear Scaling			Model Name
KEG	NS	R(XY)	KEG	NS	R(XY)	
۰/۹۳۹	۰/۹۸۳	۰/۹۹۴	۰/۸۷۴	۰/۹۸۳	۰/۹۹۴	CESM2-WACCM
۰/۸۰۷	-۰/۹۰۴	۰/۹۷۷	-۰/۸۰۷	۰/۹۰۴	-۰/۹۷۷	CMCC-CM2-SR5
۰/۹۰۱	۰/۹۷۹	۰/۹۹۵	۰/۹۰۱	۰/۹۷۹	۰/۹۹۵	CMCC-ESM2
۰/۹۹۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	EC-Earth3
۰/۹۹۴	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	EC-Earth3-Veg
۰/۹۸۲	-۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	-۰/۹۸۶	۰/۹۹۵	-۰/۹۹۸	GFDL-ESM4
۰/۸۳۵	-۰/۹۴۶	۰/۹۷۳	-۰/۹۴۲	۰/۹۴۶	-۰/۹۷۳	INM-CM4-8
۰/۸۸۴	-۰/۹۱۹	۰/۹۶۵	-۰/۹۲۰	۰/۹۱۹	-۰/۹۶۵	INM-CM5-0
۰/۹۷۴	-۰/۹۸۳	۰/۹۹۲	-۰/۹۷۴	-۰/۹۸۳	-۰/۹۹۲	MPI-ESM1-2-HR
۰/۹۵۷	-۰/۹۸۴	۰/۹۹۴	-۰/۹۵۷	۰/۹۸۴	-۰/۹۹۴	MRI-ESM2-0
۰/۹۶۰	-۰/۹۸۰	۰/۹۹۱	-۰/۹۶۰	۰/۹۸۰	-۰/۹۹۱	TaiESM1

SSP2-4.5 و SSP1-2.6، PT، بیشتر و در روش 4.5 و SSP1-2.6، PT، بیشتر و در روش 4.5 در فوریه (بهمن) بارش بالاتر و در می (اردیبهشت) تمام سناریوها بارش کم‌تر از مشاهداتی پیش‌بینی کردند. با توجه به نتایج به‌دست آمده مدل EC-Earth3-Veg و روش مقیاس‌کاهی LS پیش‌بینی بارش در دوره آبی را با خطای کم‌تر و قابل‌قبول‌تری ارائه کرده است.

با توجه به شکل ۴ در ایستگاه مهرآباد در مدل EC-Earth3-Veg هر دو روش تصحیح‌اریبی نتایج تقریباً مشابهی داشتند و در ژانویه (دی)، فوریه (بهمن) و آوریل (اردیبهشت) سناریوها بارش بیشتر از مشاهداتی و در دسامبر (آذر) بارش کم‌تر از مشاهداتی و در مدل GFDL-ESM4 هر دو روش در ماه دسامبر (آذر)، مارس (اسفند) و می (اردیبهشت) بارش کم‌تر از مشاهداتی و در فوریه (بهمن) - SSP2-



شکل ۴- نتایج داده‌کاوی سناریوهای SSP مدل EC-Earth3-Veg و GFDL-ESM4 در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) ایستگاه مهرآباد

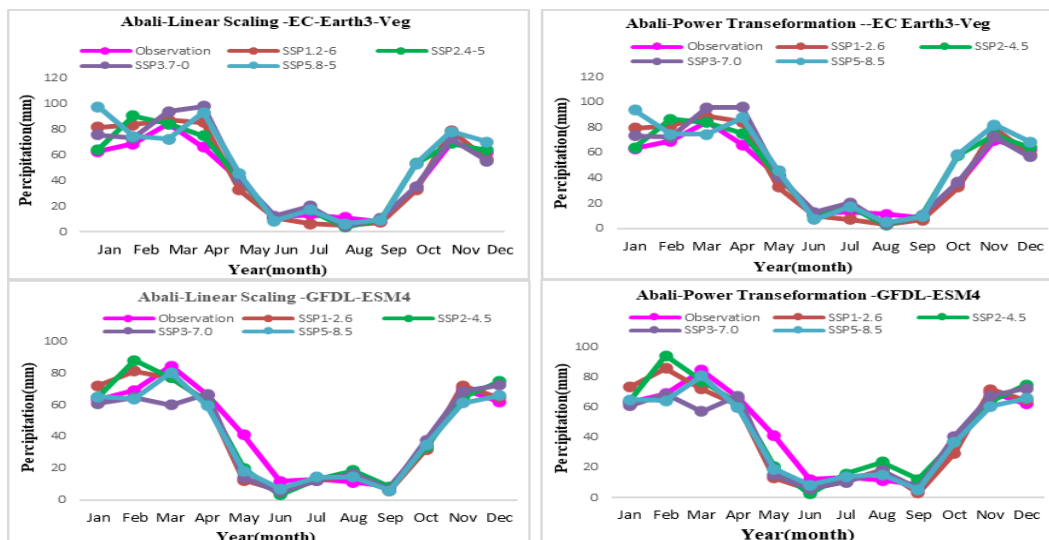


شکل ۵- نتایج داده‌کاوی سناریوهای SSP مدل EC-Earth3-Veg و GFDL-ESM4 در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) ایستگاه شمیران

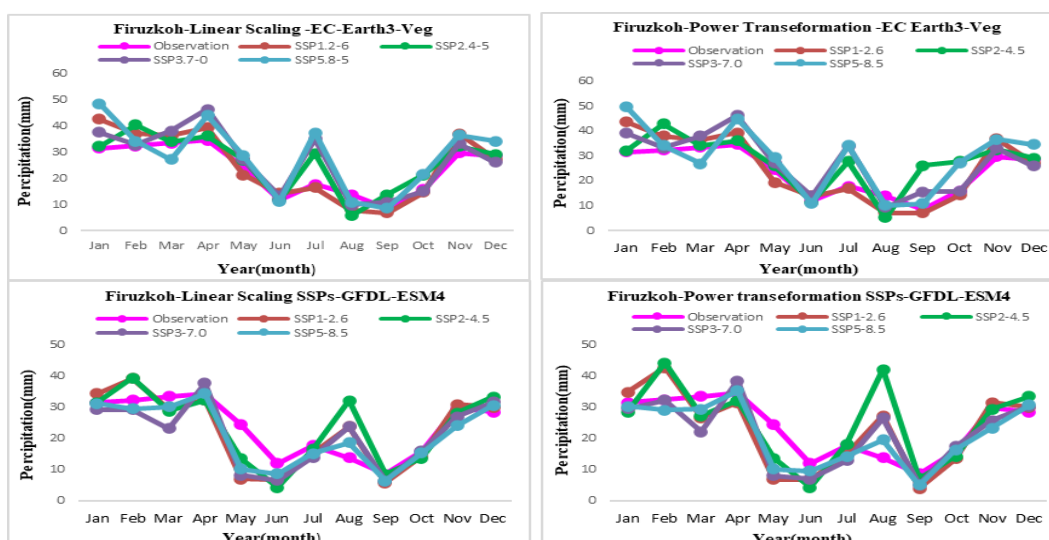
با توجه به شکل ۷ در ایستگاه فیروزکوه در مدل EC-Earth3-Veg هر دو روش تصحیح اریبی نتایج تقریباً مشابهی داشتند، تمام SSPها در ماه ژانویه (دی)، فوریه (بهمن)، آوریل (فروردین)، نوامبر (آبان) و سپتامبر (شهریور) بارش بالاتر، SSP5-8.5 در مارس (اسفند) بارش کم‌تر، به غیر از SSP1-2.6 باقی SSPها در جولای (تیر) بارش بالاتر و در دسامبر (آذر) بارش بالاتر از مشاهداتی پیش‌بینی می‌کنند. در مدل GFDL-ESM4 هر دو روش تصحیح اریبی نتایج تقریباً مشابهی داشتند، در فوریه (بهمن) SSP1-2.6 و SSP2-4.5 بارش بالاتر، در دسامبر (آذر) و آگوست (مرداد) تمام SSPها بارش بیشتر و در ژوئن (خرداد)، می (اردیبهشت) و مارس (اسفند) همه SSPها بارش کم‌تر از مشاهداتی پیش‌بینی کردند. یکی از فرضه‌های مهم در بیشتر محاسبات آماری تصادفی بودن مشاهدات است و انحراف از فرض تصادفی بودن می‌تواند به علت تغییر تدریجی خطی (روند کاهشی یا افزایشی)، تغییر ناگهانی، وجود رفتارهای دوره‌ای و یا افزایش تغییرپذیری، نوسانات زمانی و برخی عوامل دیگر باشد. با توجه به نتایج این پژوهش ماه‌های ژوئن (خرداد) تا نوامبر (آبان) تقریباً خشک می‌باشد و بخش مهمی از بارش‌های جوی از دسامبر (آذر) تا می (اردیبهشت) می‌بارد و هر دو مدل مطالعاتی، افزایش بارش در این ماه‌ها را نشان دادند. این افزایش بارش توسط سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5 که سناریوهای خوشبینانه و حد واسط هستند بهتر پیش‌بینی شده است. شجاع و شمسی‌پور (۱۴۰۱) و حجازی‌زاده و پروین (۱۳۸۷) هم در مطالعات خود این نتایج را بیان نموده‌اند. در جدول ۵ معادل‌های شمسی ماه‌های میلادی بیان شده است.

با توجه به شکل ۵ در ایستگاه شمیران در مدل EC-Earth3-Veg در روش تصحیح LS در فوریه (بهمن) و آوریل (فروردین) تمام SSPها و در مارس (اسفند) SSP1-2.6 و SSP3-7.0 و در ژانویه (دی) SSP3-7.0، SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بارش بالاتر از مشاهداتی پیش‌بینی کردند. در روش PT مشاهده می‌شود، در ماه جولای (تیر) و آگوست (مرداد) SSP3-7.0 و SSP5-8.5 تغییراتی غیرعادی در بارش را نشان می‌دهند و بارش بالاتری را نسبت به داده‌های مشاهداتی پیش‌بینی کرده‌اند که در SSP5-8.5 بالاتر از ۲۰۰ میلی‌متر بارش پیش‌بینی شده است که ممکن است، مقیاس‌های داده‌ها با خطا مواجه شده و و پیش‌نگری به درستی انجام نشده باشد. در باقی ماه‌ها تغییرات قابل ملاحظه‌ای پیش‌بینی نشده است. در مدل GFDL-ESM4 هر دو روش تقریباً نتایج مشابهی ارائه کردند، در فوریه (بهمن) SSP1-2.6 و SSP2-4.5 بالاتر و تمام SSPها در مارس (اسفند) و می (اردیبهشت) بارش کم‌تر از مشاهداتی و همه سناریوها به جز SSP3-70 در دسامبر (آذر) بارش کم‌تر از مشاهداتی پیش‌بینی کردند.

با توجه به شکل ۶ در ایستگاه ابعلی در مدل EC-Earth3-Veg هر دو روش تصحیح، تمام SSPها در ماه ژانویه (دی)، فوریه (بهمن) و آوریل (فروردین) بارش بالاتر و در اکتبر (مهر) SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بارش بالاتر و SSP5-8.5 در مارس (اسفند) و SSP1-2.6 در جولای (تیر) بارش کم‌تر از مشاهداتی و در مدل GFDL-ESM4 در می (اردیبهشت) و دسامبر (آذر) تمام SSPها بارش کم‌تر، در فوریه (بهمن) SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بارش بالاتر و در دسامبر (آذر) تمام SSPها بارش بالاتر از مشاهداتی پیش‌بینی کردند.



شکل ۶- نتایج داده‌کاوی سناریوهای SSP مدل EC-Earth3-Veg و GFDL-ESM4 در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) ایستگاه آبدلی



شکل ۷- نتایج داده‌کاوی سناریوهای SSP مدل EC-Earth3-Veg و GFDL-ESM4 در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) ایستگاه فیروزکوه

جدول ۵- معادل شمسی ماه‌های میلادی

تعداد روزها	معادل شمسی	ماه میلادی	شماره
۳۱	۱۱ دی تا ۱۱ بهمن	ژانویه	۱
۲۸	۱۲ بهمن تا ۹ اسفند	فوریه	۲
۳۱	۱۰ اسفند تا ۱۱ فروردین	مارس	۳
۳۰	۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت	آوریل	۴
۳۱	۱۱ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد	می	۵
۳۰	۱۱ خرداد تا ۹ تیر	ژوئن	۶
۳۱	۱۰ تیر تا ۹ مرداد	جولای	۷
۳۱	۱۰ مرداد تا ۹ شهریور	اگوست	۸
۳۰	۱۰ شهریور تا ۸ مهر	سپتامبر	۹
۳۱	۹ مهر تا ۹ آبان	اکتبر	۱۰
۳۰	۱۰ آبان تا ۹ آذر	نوامبر	۱۱
۳۱	۱۰ آذر تا ۱۰ دی	دسامبر	۱۲

سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بهره گرفته شده است. این شاخص در چهار ایستگاه سینوپتیک مهرآباد، شمیران، آبدلی و فیروزکوه در دوره‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه

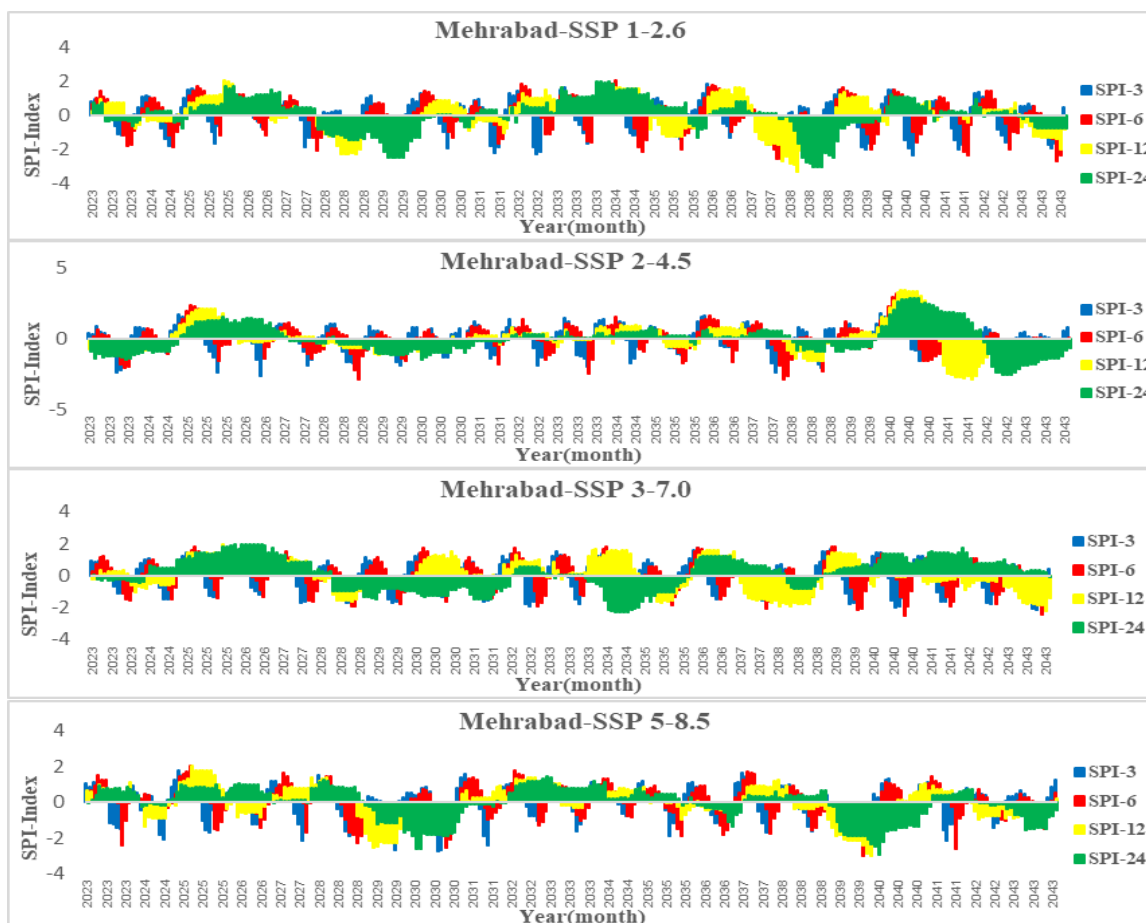
محاسبه شاخص خشکسالی هواشناسی SPI در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۴) برای محاسبه شاخص SPI در دوره آینده (۲۰۲۳-۲۰۴۳) از

محاسبه گردید و نتایج آن‌ها در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. براساس شکل ۸ در ایستگاه مهرآباد، شدیدترین خشکسالی براساس SSP1-2.6 و شاخص SPI-12 در مارس (اسفند) ۲۰۳۸ با شدت $-۳/۲۸$ و شدیدترین ترسالی براساس SSP2-4.5 و شاخص SPI-12 در می (اردیبهشت) ۲۰۴۰ با شدت $۳/۴۱$ رخ خواهد داد.

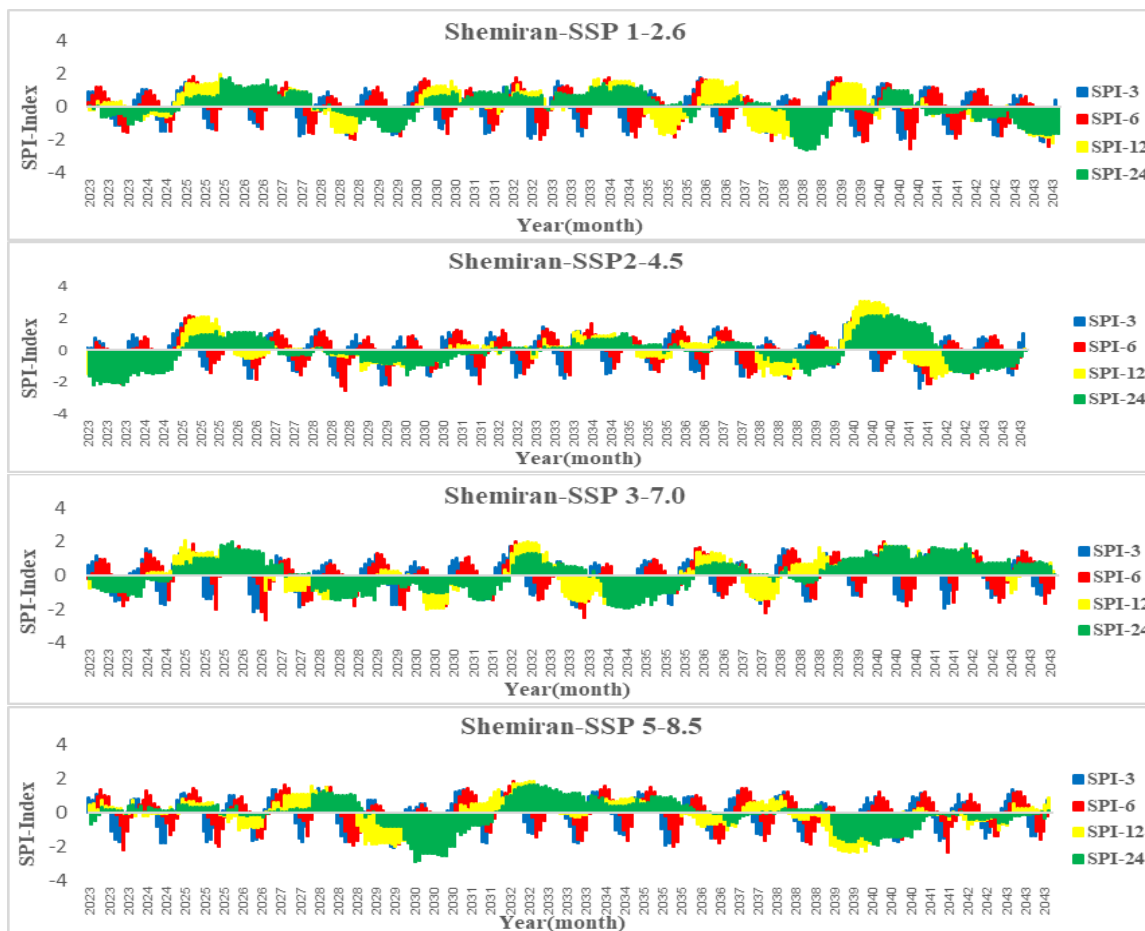
مطابق با شکل ۹ در ایستگاه شمیران شدیدترین خشکسالی براساس SSP5-8.5 و شاخص SPI-24 با شدت $-۲/۸۷$ در فوریه (بهمن) ۲۰۳۰ و شدیدترین ترسالی براساس SSP2-4.5 و شاخص SPI-12 با شدت $۳/۰۹$ در می (اردیبهشت) ۲۰۴۰ رخ خواهد داد. مطابق با شکل ۱۰ در ایستگاه ابدلی شدیدترین خشکسالی براساس SSP2-4.5 و شاخص SPI-3 در آگوست (مرداد) ۲۰۴۱ با شدت $-۳/۴۹$ و شدیدترین ترسالی براساس SSP2-4.5 و شاخص SPI-12 با شدت $۳/۵۹$ در می (اردیبهشت) ۲۰۴۰ رخ خواهد داد.

داد.

با توجه به شکل ۱۱ در ایستگاه فیروزکوه شدیدترین خشکسالی براساس SSP2-4.5 و شاخص SPI-3 در آگوست (مرداد) ۲۰۴۱ و شدیدترین ترسالی براساس SSP2-4.5 و شاخص SPI-12 در می (اردیبهشت) ۲۰۴۰ با شدت $۳/۶۸$ رخ خواهد داد. با توجه به SSP1-2.6 که نسبتاً خوشبینانه می‌باشد در فصل پاییز بارش‌ها به شدت کاهش یافته به طوری که میزان شاخص SPI فصلی نشان داد شدیدترین خشکسالی در سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۳۷ با شدت $-۲/۸۷$ و براساس SPI سالانه در فصل زمستان سال ۲۰۳۸ خشکسالی با شدت $-۳/۲۸$ و شدیدترین ترسالی را در ۲۰۴۰ با شدت $۳/۴۱$ خواهیم داشت. براساس سناریوی SSP2-4.5 که سناریوی خوشبینانه است سال‌های ۲۰۴۰ و ۲۰۲۵ شدیدترین ترسالی‌ها را با شدت $۳/۰۹$ و کاهش بارش‌ها را در پاییز خواهیم داشت.



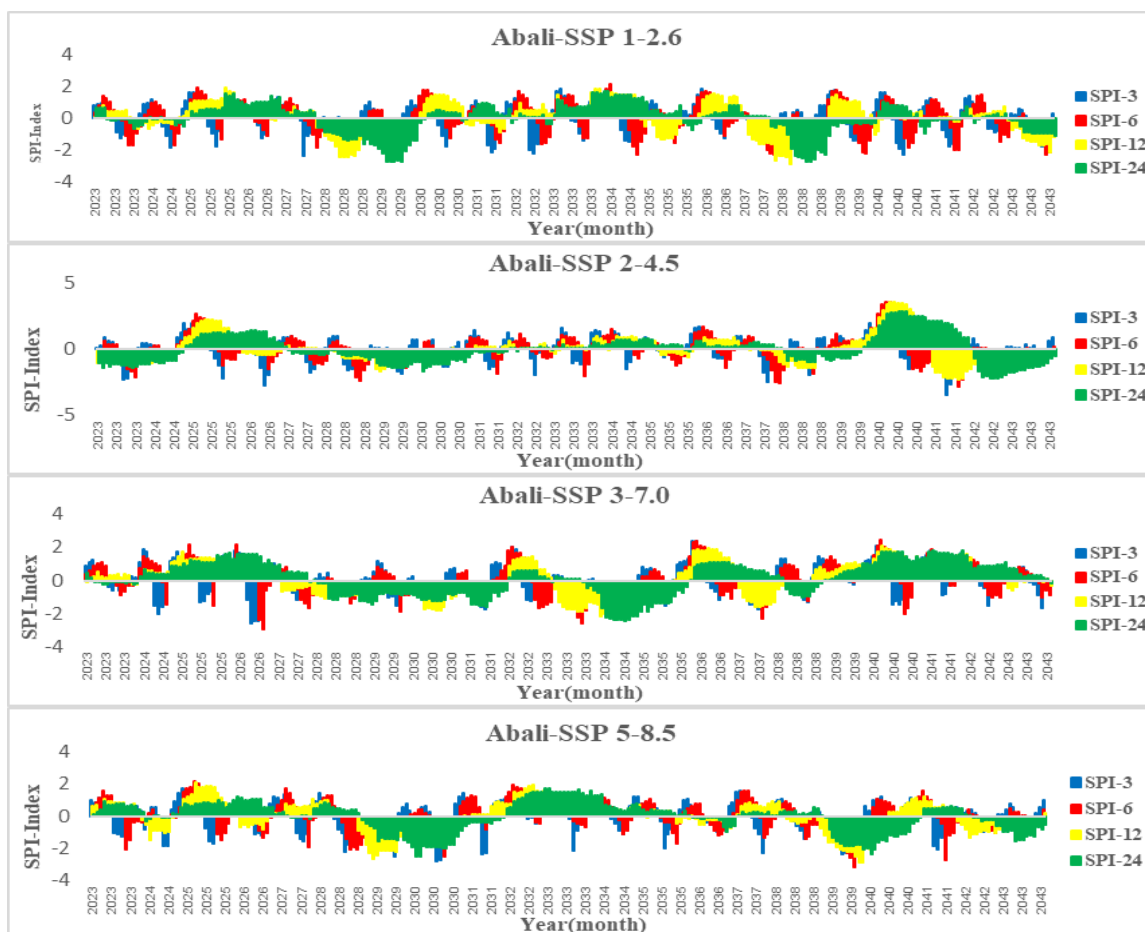
شکل ۸- شاخص SPI براساس SSPهای مورد مطالعه در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) ایستگاه مهرآباد



شکل ۹- شاخص SPI براساس SSPهای مورد مطالعه در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) در ایستگاه شمیران

محققین دیگری مانند: احمدآبادی و همکاران، بیرنس و همکاران، امیررضاییه و همکاران، رحیمی، علیمحمدی و شمس، حجازی‌زاده و همکاران در مطالعات خود به افزایش دما و تغییرات میزان بارش در اثر تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی اشاره نموده‌اند (Ahmadabadi; Rahimi,) (Binesh et al., 2017) and Sedighifar, 2018) and Shams, 2015); (Amirrezaeieh et al., 20172021) و (Hejazizadeh et al. 2022). علاوه بر این صرفاً و همکاران در پژوهشی در شمال غرب ایران با استفاده از سناریوهای SSP به شبیه‌سازی بارش تا پایان قرن ۲۱ پرداختند و نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها، بارش ۶/۲ درصد براساس SSP1-2.6 افزایش و براساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب ۵/۱۴ و ۶/۳ درصد کاهش خواهد یافت (Sarraf et al., 2024). براساس نتایج حاصل از پژوهش در تمامی ایستگاه‌ها در سال ۲۰۴۰ ترسالی با شدت حداکثر ۳/۶۸ خواهیم داشت. سناریوی SSP2-4.5 که سناریوی حد واسطه و خوشبینانه است و شاخص SPI-12 (سالانه) در تمام ایستگاه‌ها خشکسالی و ترسالی‌ها با دقت بالاتری پیش‌بینی کرده‌اند و رخداد خشکسالی و ترسالی براساس سناریوهای خوشبینانه بیشتر است.

براساس سناریوی SSP3-7.0 نیز بارش‌های قابل قبولی در پاییز و ژانویه نخواهیم داشت و شدت آن در ۲۰۴۰ و ۲۰۴۳ حدود ۲/۶۲- و در فصل پر بارش نیز بارش‌ها خیلی قابل ملاحظه نیستند. براساس سناریوی SSP5-8.5 که سناریوی بدبینانه است بارش‌ها در فصل پاییز کاهشی می‌باشد خصوصاً در ماه اکتبر ۲۰۳۹ خشکسالی خیلی شدیدی با شدت ۳/۰۴- و در سال ۲۰۴۱ خشکسالی با شدت ۲/۵۸- خواهیم داشت و در فصل پر بارش هم بارش‌ها خیلی قابل ملاحظه نیستند و در سال ۲۰۲۵ ترسالی با شدت ۲/۰۳ خواهیم داشت. با توجه به نتایج این پژوهش بارش‌ها خیلی قابل ملاحظه نیستند و در اکثر سال‌ها کاهش بارش را خواهیم داشت و تنها در بعضی سال‌ها بارش روند افزایشی خواهد داشت. نتایج این پژوهش براساس SSP2-4.5 که سناریوی خوشبینانه و SSP5-8.5 سناریوی کاملاً بدبینانه در سال ۲۰۲۵ ترسالی اتفاق خواهد افتاد. با توجه به شرایط کنونی وضعیت بارش در شهر تهران می‌توان دریافت مدل‌های انتخابی نتایج قابل قبولی ارائه دادند و جهت پیش‌بینی تغییرات بارش شهر تهران مدل‌های مناسبی می‌باشند. نتایج حاصل از این مطالعه، مطابق با نتایج پژوهش (Shoja and Shamsipour, 2023) می‌باشد.



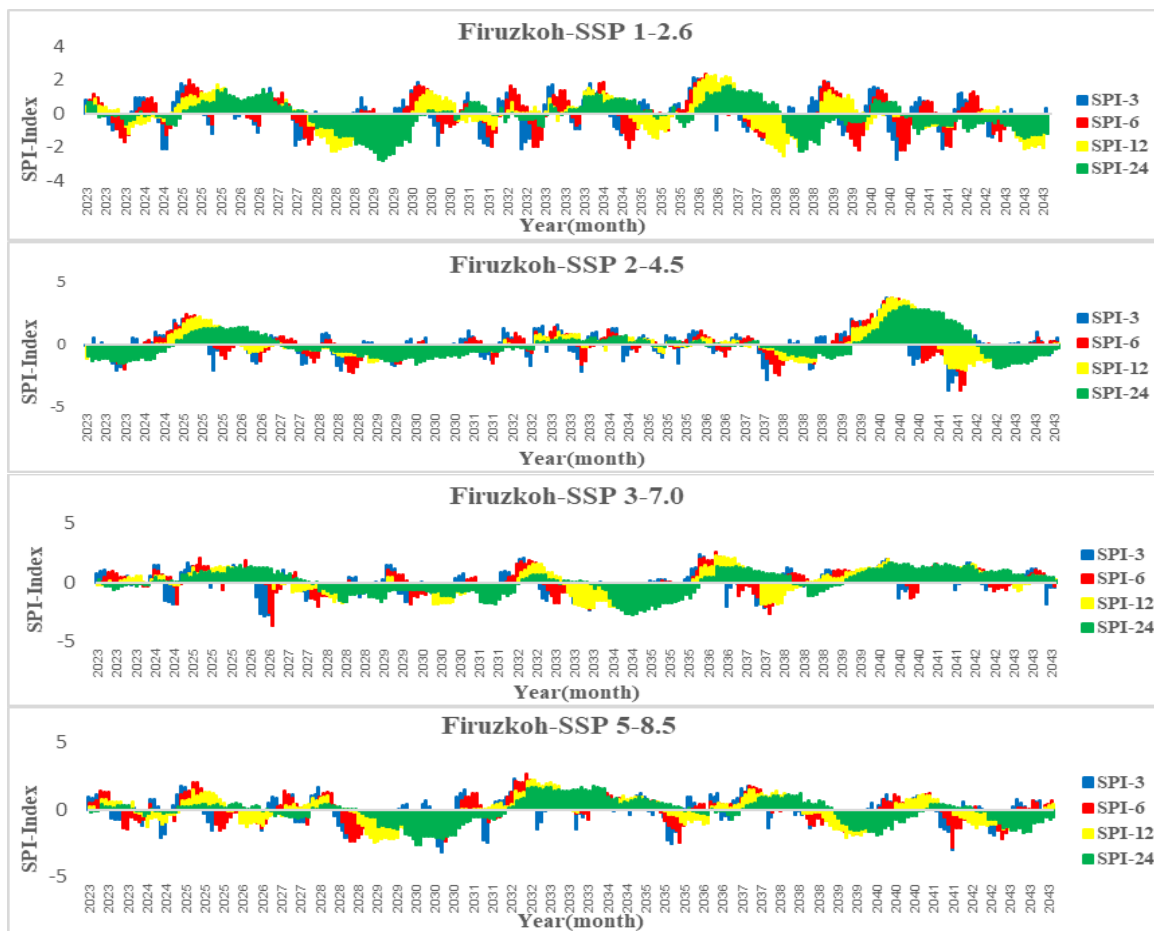
شکل ۱۰- شاخص SPI براساس SSPهای مورد مطالعه در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) در ایستگاه آبعلی

شبه‌سازی بارش به‌منظور بررسی تغییرات اقلیمی و خشکسالی ناشی از آن بسیار اهمیت دارد.

نتیجه‌گیری

افزایش دما، گرم‌شدن زمین و کاهش بارندگی از جمله تغییرات اقلیمی هستند که حیات بشر و موجودات زنده را تحت تأثیر قرار داده است. تهران، پایتخت ایران، یکی از پرجمعیت‌ترین و خشک‌ترین شهرهای جهان است. شهر تهران، یکی از شهرهایی است که بیشترین تأثیر را از تغییرات آب‌وهوایی می‌پذیرد. این کلان‌شهر با مشکلاتی مانند افزایش دما، کاهش بارندگی، خشکسالی و سیل مواجه است. هدف از این مطالعه پایش و پیش‌بینی خشکسالی شهر تهران با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI براساس داده‌های گزارش ششم IPCC می‌باشد.

همچنین براساس سناریوی خوش‌بینانه بیشترین نوسانات بارش را در دهه‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۴۰ رخ خواهد داد و در مطالعات زرین و صالح‌آبادی (۱۳۹۷) نیز بیان شده است. نتایج پیش‌نگری انحصاری مهابادی و همکارانش کاهش ۵ درصدی بارش در دوره (۲۰۲۰-۲۰۳۹) براساس مدل‌های گزارش ششم نیز این موضوع را تأیید می‌کند (Ansari et al., 2022). به‌طور کلی، آب‌وهوای استان تهران تحت تأثیر سامانه‌های جوی مختلف قرار دارد که از مهم‌ترین آن‌ها کم‌فشارهای مدیترانه‌ای و سودانی است. هر قدر فراوانی این سامانه‌ها روی منطقه کم‌تر باشد، از میزان بارش سالانه کاسته شده، در نتیجه منجر به خشکسالی و کم‌آبی می‌شود به‌طور کلی می‌توان گفت که توانایی مدل‌های GCM در پیش‌نگری اقلیم آینده با توجه به اقلیم هر منطقه و متغیر اقلیمی پیش‌بینی‌شده متفاوت است. با توجه به حجم بالای داده‌های مدل‌های GCM و افزایش دقت مدل‌ها در گزارش ششم IPCC، انتخاب مدل مناسب برای



شکل ۱۱- شاخص SPI براساس SSPهای مورد مطالعه در دوره (۲۰۲۳-۲۰۴۳) در ایستگاه فیروزکوه

برای حصول نتیجه بهتر برای پایش و پیش‌بینی خشکسالی در شهر تهران از پژوهشگران و محققان در این زمینه درخواست می‌شود شاخص‌ها و دیگر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی را در آینده مورد مطالعه قرار دهند.

منابع

اشرفزاده، ا.، صالح پور، ج. و شریفی، آ. ۱۴۰۱. بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر ویژگیهای خشکسالی هواشناسی حوضه آبخیز حبله‌رود با استفاده از مدل گردش عمومی جو HADCM3 و نمایه‌های SPI و مجله انسان و محیط زیست. ۲۰(۲): <https://civilica.com/doc/1871963>

حجازی زاده، ز. و پروین، ن. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات دما و بارش تهران طی نیم قرن اخیر. فصلنامه علمی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری پیش شماره (۰): ۴۳-۵۶.

زرین، آ. و صالح آبادی، ن. ۱۳۹۸. "پیش‌آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران بر اساس برونداد مدل های CMIP6". ششمین کنفرانس

در ابتدا ۱۱ مدل از مدل‌های GCM که حاوی داده‌های تاریخی و سناریوهای 1, 2, 3, 5 SSP1 بارش روزانه بودند، انتخاب شدند و از بین این مدل‌ها سه مدل همبستگی بالایی با داده‌های مشاهداتی داشتند به عنوان مدل برتر انتخاب شدند. آن‌گاه پیش‌بینی ترسالی و خشکسالی با استفاده از داده‌های سناریوها در بازه زمانی (۲۰۲۳-۲۰۴۳) و شاخص SPI صورت گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد، الگوی بارش در تهران تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر یافته است و میزان بارش‌ها خصوصاً در پاییز، روندی نزولی داشته است و سلیقه نیز این نتیجه را در مطالعات خود اظهار نموده است (Saligheh, 2015). با توجه به نتایج این پژوهش، در اکثر ماه‌های بارشی، بارش‌ها خیلی روند افزایشی ندارند و از اواخر تابستان تا اوایل زمستان بارش‌ها بسیار کم و ناچیز هستند و این مسئله در مطالعات دیگر نیز بیان شده است. برای مدیریت این تغییرات و کاهش تأثیرات آن بر شهر تهران، نیاز به اتخاذ راهکارهای مناسب است. لذا مدیریت صحیح منابع آب در محدوده مورد مطالعه امری ضروری می‌باشد و نیازمند برنامه‌ریزی جامع در راستای سازگاری با تغییرات اقلیمی می‌باشد، تا در سال‌هایی که با کاهش شدید بارش مواجه هستیم دچار معضل کم‌آبی نشویم.

- Bordi, I. and Alfonso, S. 2004. Drought Variability and Its Climatic Implications. *Global and Planetary Change* 40(1-2):115-27.
- Byun, H.R. and Wilhite, D. A. 1999. Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate* 12(9):2747-56.
- Cancelliere, A., Di Mauro, G., Bonaccorso, B. and Rossi, G. 2007. Drought Forecasting Using the Standardized Precipitation Index. *Water Resources Management* 21(5):801-19. doi: 10.1007/s11269-006-9062-y.
- Chamanehfar, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I. and Modaresi, F. 2022. Future Projection for Extreme Indices of Precipitation and Temperature over the Period 2026-2100 Based on the Output of CMIP6 Models (Case Study: Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 16(5):963-76. doi: 20.1001.1.20087942.1401.16.5.7.2
- Edwards, D. C. and McKee, T.B. 1997. Characteristics of 20 Th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. Vol. 97. Colorado State University Fort Collins.
- Ershadfath, F., Raeini Sarjaz, M., Shahnazari, A. and Olesen, J.E. 2022. Application of Linear Scaling Post-Processing Method for Bias Correction of Climate Models Retrieved from CMIP6. *Iran-Water Resources Research*. 18(3):131-44.
- Espinosa, L. A., Portela, M.M., Matos, J.P. and Gharbia, S. 2022. Climate Change Trends in a European Coastal Metropolitan Area: Rainfall, Temperature, and Extreme Events (1864-2021). *Atmosphere*. 13(12):1995.
- Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V. and Ramezani Etedali, H. 2021. Simulating the Effects of Climate Change on Runoff Using the CMIP5 and CMIP6 Climate Models by SWAT Hydrological Model (Case Study: Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*. 17(3):345-59.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S.C., Collins, W., Cox, V., Driouech, F., Emori, S. and Eyring, V. 2014. Evaluation of Climate Models. Pp. 741-866 in *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*. 377(1-2):80-91.
- Hayes, M. J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A. and Vanyarkho, O.V. 1999. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Abdolalizadeh, F., Khorshiddoust, A.M. and Jahanbakhsh, S. 2022. "Assessment of the Performance of CMIP6 Model for Analysis of Temperature and Precipitation in Urmia Lake Basin." *Climate Change Research*. 3(11):17-30. doi: 10.30488/ccr.2022.361233.1093.
- Ahmadabadi, A. and Sedighifar, Z. 2018. "Prediction of Climate Change Induced Hydrogeomorphology by Using SDSM in CAN Watershed TT -." *Jgs* 18(51):103-14. doi: 10.29252/jgs.18.51.103.
- Akinsanola, A.A., Ongoma, V. and Kooperman, G.J. 2021. "Evaluation of CMIP6 Models in Simulating the Statistics of Extreme Precipitation over Eastern Africa." *Atmospheric Research*. 254:105509.
- Alizadeh-Choobari, O. and Najafi, M.S. 2017. Trends and Changes in Air Temperature and Precipitation over Different Regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*. 43(3):569-84. doi: 10.22059/jesphys.2017.60300.
- Amirrezaeieh, A. R., Porhemmat, J. and Ahmadi, F. 2017. Investigation of Precipitation and Temperature Trend Across the North West of Iran in Recent Half of the Century. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 10(6):797-809.
- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M.J. and Farokhnia, A. 2022. Investigation of Temperature and Precipitation Changes in the Iran's Basins in the next 20 Years Based on the Output of CMIP6 Model. *Iranian Water Researches Journal*. 16(1):11-24. doi: 10.22034/iwrj.2022.11204.
- Ataei, H., Kouhi, H., Modirian, R. and Bazrafshan, B. 2021. Projected Changes in Temperature and Precipitation over Kashafrood Basin Based on Statistical and Dynamical Downscaling Methods. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 10(30):183-202. doi: 10.22111/jneh.2021.37827.1777.
- Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., Falamarzi, Y. and Malbusi, Sh. 2023. Projection of Iran's Precipitation in 21st Century Using Downscaling of Selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*. 49(2):431-49. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436.
- Baghbanan, P., Abadi, A.A. and Karimi, A. 2021. Investigating the Effect of Climate Change on Hydrological Changes in Hablehrood Catchment. *Climate Change Research* 2(5):27-40. doi: 10.30488/ccr.2020.251868.1025.
- Binesh, N., Nik Sokhan, Mh., and Sarang, A. 2017. Trend Detection in Tehran Temperature and Precipitation during 1984-2014. *NIVAR*. 41(96-97), 36-45. doi: 10.30467/nivar.2017.45153

- Millman, K. J. and Aivazis, M. 2011. "Python for Scientists & Engineers." *Computing in Science & Engineering*. 13(2):9–12.
- Mitchell, T. D. 2003. Pattern Scaling: An Examination of the Accuracy of the Technique for Describing Future Climates. *Climatic Change*. 60(3):217–42.
- Muhammad, A., Zulfiqar, A., Ilyas, M., Mohsin, M. and Niaz, R. 2023. A Common Factor Analysis Based Data Mining Procedure for Effective Assessment of 21st Century Drought under Multiple Global Climate Models. *Water Resources Management*. 37(12):4787–4806.
- Niroumandfard, F., khashei, A., Hashemi, R. and ghorbani, Kh. 2022. Investigation of Climate Change Projection on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 53(9):2009–26. doi:10.22059/ijswr.2022.343936.669284
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F. and Lowe, J. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 9(9):3461–82.
- Patel, D., Kumari, P. and Patel, N. 2010. Synthesis and Characterization of Some New Thiazolidinones Containing Coumarin Moiety and Their Antimicrobial Study. *Archives of Applied Science Research*. 2(6):68–75.
- Rahimi, F. 2021. Modeling of Climate Change Effects in Tehran Province Watershed. Master Degree. Thesis, Tehran University. Tehran, Iran.
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I. and Arnold, J. G. 2016. CMhyd User Manual: Documentation for Preparing Simulated Climate Change Data for Hydrologic Impact Studies. Texas: SWAT.
- Rezaie Narimisa, Mo. and Rezaie Narimisa, Ma. 2018. Climate Change and Global Warming; Causes, Evidence and Effects in Local Scale. *Revista Publicando*. 5(14):484–93.
- Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., Brian, O'Neill, B.C., Fujimori, Sh., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R. and Fricko, O. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and Their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview. *Global Environmental Change* 42:153–68.
- Saligheh, M. 2015. Climate Change and Climate Hazards in Tehran TT. *Jsaeh*. 2(3):15–32. doi: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.3.15.
- Salimi, L., Masoompour, J., Mojarrad, F. and Jalilian, A. 2023. Exploring the Probability of Drought and 80(3):429–38.
- Hejazizadeh, Z., Akbari, M., Sasanpour, F., Hosseini, A. and Mohammadi, N. 2022. Investigating the Effects of Climate Change on Torrential Rains in Tehran Province. *Water and Soil Management and Modelling*. 2(2):87–105. doi: 10.22098/mmws.2022.9958.1075.
- Hertzberg, M., Siddons, A. and Schreuder, H. 2017. Role of Greenhouse Gases in Climate Change. *Energy & Environment*. 28(4):530–39.
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. and Demuth, S. 2001. Have Streamflow Droughts in Europe Become More Severe or Frequent? *International Journal of Climatology* 21(3):317–33.
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanaei Nejad, S.H. and Khalili, D. 2019. Simulation of Climate Change Impacts Using Fifth Assessment Report Models under RCP Scenarios on Water Resources in the Upper Basin of Salman Farsi Dam. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. 13(2):243–5.
- Koohi, S., Azizian, A. and Mazandarani zadeh, H. 2022. The Effects of Climate Change on Drought Conditions Using Fuzzy Logic Under SSP3 and SSP5 Scenarios. *Iran-Water Resources Research* 18(3):1–17.
- Leander, R. and T. Buishand, A. 2007. Resampling of Regional Climate Model Output for the Simulation of Extreme River Flows. *Journal of Hydrology*. 332(3–4):487–96.
- Maraun, D. 2012. Nonstationarities of Regional Climate Model Biases in European Seasonal Mean Temperature and Precipitation Sums. *Geophysical Research Letters* 39(6). doi: https://doi.org/10.1029/2012GL051210.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales.
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D. and Alvarado-Gamboa, L.F. 2020. Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water*. 12(2):482.
- Mendicino, G., Senatore, A. and Versace, P. 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for Drought Monitoring and Forecasting in a Mediterranean Climate. *Journal of Hydrology*. 357(3–4):282–302.
- Mianabadi, A., Bateni, M.M. and S Mohammadi, S. 2023. Projection of Change in the Distribution of Precipitation and Temperature Using Bias-Corrected Simulations of CMIP6 Climate Models (Case Study: Kerman Synoptic Station). *Climate Change Research* 4(14):65–84. doi: 10.30488/ccr.2023.399780.1139.

2011. The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation. *Computing in Science & Engineering*. 13(2):22–30.
- Vicente-Serrano, S.M. and López-Moreno, J.I. 2005. Hydrological Response to Different Time Scales of Climatological Drought: An Evaluation of the Standardized Precipitation Index in a Mountainous Mediterranean Basin.” *Hydrology and Earth System Sciences*. 9(5):523–33.
- Wang, J. and Kotamarthi, V.R. 2015. High-Resolution Dynamically Downscaled Projections of Precipitation in the Mid and Late 21st Century over North America. *Earth’s Future*. 3(7):268–88. doi: <https://doi.org/10.1002/2015EF000304>.
- Yazdani, D., Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A.A. 2024. Evaluation of Bias Correction Methods in Improving the Direct Model Output of Temperature in CMIP over Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*. 50(2):429–50. doi: [10.22059/jesphys.2024.363498.1007547](https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.363498.1007547).
- Yousefi, M., khaledi, Sh. and Asadian, F. 2024. Forecasting and Investigating the Future of Climate Change in Tehran City TT -. *Jfcvir* 5(1):179–97.
- Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B. and Faisal I. Khan. 2011. A Review of Drought Indices. *Environmental Reviews*. 19(NA):333–49.
- Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A.A. 2021. Projected Consecutive Dry and Wet Days in Iran Based on CMIP6 Bias-corrected Multi-model Ensemble. *Journal of the Earth and Space Physics*. 47(3):561–78. doi: [10.22059/jesphys.2021.319270.1007295](https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.319270.1007295).
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A.A. and Salehabadi, N. 2021. Projected Temperature Anomalies and Trends in Different Climate Zones in Iran Based on CMIP6. *Iranian Journal of Geophysics*. 15(1):35–54. doi: [10.30499/ijg.2020.249997.1292](https://doi.org/10.30499/ijg.2020.249997.1292).
- Zhang, X., Chen, N., Sheng, H., Ip, C., Yang, L., Chen, Y., Sang, Z., Tadesse, T., Lim, T.P.Y. and Rajabifard, A. 2019. Urban Drought Challenge to 2030 Sustainable Development Goals. *Science of the Total Environment*. 693:133536.
- Selecting the Most Appropriate Indicator for Climatic Regions of Iran. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*. 14(53):18–39. doi: [10.22034/jargs.2023.403437.1041](https://doi.org/10.22034/jargs.2023.403437.1041)
- Shams, R. and Alimohammadi, S. 2015. Analysing effects of climate change on Tehran capital city water resources and supply, The First Annual Congress on World and Energy Crisis papers, Beheshti University, Tehran, Iran.
- Shoja, F. and Shamsipour, A.A. 2023. Projection of Future Precipitation Changes in Tehran’s Water Supply Watersheds. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 12(36):151–80. doi: [10.22111/jneh.2022.42622.1908](https://doi.org/10.22111/jneh.2022.42622.1908)
- Shukla, Sh. and Wood, A.W. 2008. Use of a Standardized Runoff Index for Characterizing Hydrologic Drought. *Geophysical Research Letters*. 35(2).
- Song, Y. H., Chung, E.S. and Shamsuddin, S. 2021. Spatiotemporal Differences and Uncertainties in Projections of Precipitation and Temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 General Circulation Model S. *International Journal of Climatology*. 41:5899–5919. doi: [10.1002/joc.7159](https://doi.org/10.1002/joc.7159).
- Stevens, M.R. and Senbel, M. 2017. Are Municipal Land Use Plans Keeping Pace with Global Climate Change? *Land Use Policy*. 68:1–14.
- Teutschbein, C. and Seibert. 2012. Bias Correction of Regional Climate Model Simulations for Hydrological Climate-Change Impact Studies: Review and Evaluation of Different Methods. *Journal of Hydrology*. 456–457:12–29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>.
- Tsakiris, G. and Vangelis, H. 2004. Towards a Drought Watch System Based on Spatial SPI. *Water Resources Management*. 18(1):1–12. doi: [10.1023/B:WARM.0000015410.47014.a4](https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000015410.47014.a4).
- Van Loon, A. F. and Laaha, G. 2015. Hydrological Drought Severity Explained by Climate and Catchment Characteristics. *Journal of Hydrology*. 526:3–14.
- Van Der Walt, S., Colbert, S.C. and Varoquaux, G.

Drought Monitoring and Prediction Using Drought Meteorological Index SPI on the Sixth Report of IPCC (Case study: Tehran city)

R. Mousavi H.¹, M. H. Jahangir^{2*}

Received: Nov.19, 2024

Accepted: Jan.26, 2025

Abstract

One of the most pressing issues of twenty first century is the climate change. Global warming coincided with the decrease in precipitation, intensified the effects of climate change. The purpose of this study is to investigate and forecast the drought in Terhran for the next 20 years. To do this study, the output of eleven models from General Circulation Model (G.C.M.) in the basic period (1994-2014) was examined. Data mining was done through CMHyd application. The statistical indices of MSE, RMSE, MAE, R2 were used to assess the accuracy of CMIP6 models in comparison with observational data. To verify the validity and making decision to select a model, Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency tests were exploited. Then, the forecast for the future time frame (2023-2043) were made by employing SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5. At last, three models of EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, and GFDL-ESM4 were recognized as the best models. These models overlapped with Tehran observational data to the highest degree. The future SPI index results indicated that the drought will have a growing trend and wet year will have a mild one without any significant increase. The prediction results according to the release scenarios showed: according to the EC-Earth3-Veg model, in all scenario, there will be a rise in precipitation in January and a decrease in December, and according to the GFDL-ESM4 model, there will be an increase in precipitation in February based on the SSP1-2.6 scenario and we will have a decrease in precipitation in May as per scenarios and an increase in precipitation in December based on all scenarios.

Keywords: Climate Changes, CMhyd Software, Meteorological Drought Index SPI, Scenarios SSP

1- Master's student, Interdisciplinary schools of sciences and technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Interdisciplinary schools of sciences and technologies, University of Tehran, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: mh.jahangir@ut.ac.ir)